

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Article, Published Version

De Ronde, J. G.; De Ruijter, W. P.

Die Auswirkungen eines verstärkten Meeresspiegelanstiegs auf die Niederlande

Die Küste

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:
Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI)

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/101258>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

De Ronde, J. G.; De Ruijter, W. P. (1987): Die Auswirkungen eines verstärkten Meeresspiegelanstiegs auf die Niederlande. In: Die Küste 45. Heide, Holstein: Boyens.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Die Auswirkungen eines verstärkten Meeresspiegelanstiegs auf die Niederlande

Von J. G. DE RONDE und W. P. M. DE RUIJTER*

Zusammenfassung

Unter der Annahme eines Anstiegs des Wasserspiegels in der Nordsee um 5 Meter werden die Auswirkungen auf die hydrologischen Verhältnisse in den Niederlanden untersucht. Den Ausgang der Untersuchungen bilden entsprechende mathematische Modelle. Es werden wasserbautechnische Maßnahmen erörtert, um die Auswirkungen zu begrenzen und ggfs. zu kompensieren. Es handelt sich bei der Arbeit um die ins Deutsche übertragene Kurzfassung der Studie des Dienstes für Küstengewässer des Niederländischen Rijkswaterstaat mit dem Titel „Zeespiegelrijzing - Worstelen met wassend water“ (Nota: GWAO-86.002).

Summary

The consequences for the Netherlands of a 5 m rise in the North Sea mean sea level are described based on the results of numerical model investigations.

Hydrotechnical measures to limit or to compensate for the effects of the rising water level are discussed. The following treatise is a German translation of the summary report: "Zeespiegelrijzing - Worstelen met wassend water" (Nota: GWAO - 86.002) of the Rijkswaterstaat, in the Netherlands.

Inhalt

Vorwort	124
1. Einleitung	127
2. Die Veränderung der Wasserbewegung in der Nordsee	128
2.1 Einleitung	128
2.2 Veränderungen in der Gezeitenbewegung	128
2.3 Veränderungen der Tidekurven bei Sturmfluten	132
3. Veränderung des Salzgehalts in den niederländischen Ästuaren	136
3.1 Einleitung	136
3.2 Berechnungen und Randbedingungen	136
3.3 Ergebnisse	136
4. Geohydrologische Folgen	138
4.1 Einleitung	138
4.2 Kwel	138
4.3 Süßwasservorrat	142
5. Veränderungen der Wellen und des Seegangsklimas	144
5.1 Einleitung	144
5.2 Besprechung einiger Computerberechnungen	145
6. Morphologische Folgen	149

* Am Zustandekommen dieser Untersuchung haben viele Mitarbeiter des Rijkswaterstaat mitgewirkt. Autoren bzw. Koautoren eines oder mehrerer Kapitel waren: J. P. Boon, B. J. E. ten Brink, A. van der Giessen, D. J. de Jong, V. N. de Jonge, L. H. M. Kohsiek, D. J. Kylstra, R. Misdorp, M. Pluim, J. H. de Reus, J. G. de Ronde, W. P. M. de Ruijter, W. Verbakel, J. A. Vogel, A. van der Wekken, J. Wiersma. - Die Schlußredaktion lag bei J. G. de Ronde und W. P. M. de Ruijter, wobei letztgenannter zugleich Projektleiter war.

6.1	Einleitung	149
6.2	Die „Geschlossene Küste“	150
6.3	Ästuarische Systeme	152
6.3.1	Allgemeines	152
6.3.2	Das Wattenmeer	153
6.3.3	Das Deltagebiet	157
7.	Folgen für die Umwelt	158
7.1	Einleitung	158
7.2	Folgen	158
7.2.1	Folgen für die Gebiete mit verschiedenen Landschaftstypen	159
7.2.2	Folgen für die Wasserqualität	160
7.2.3	Auswirkungen von physischen Veränderungen	160
8.	Lösungen	161
8.1	Offene Varianten	161
8.1.1	Wattenmeer	161
8.1.2	Geschlossene Küste	161
8.1.3	Deltagebiet	162
8.2	Geschlossene Varianten	162
8.2.1	Wattenmeer	162
8.2.2	Geschlossene Küste	163
8.2.3	Deltagebiet	163

VORWORT:

Der Meeresspiegel ist zu allen Zeiten weltweit langzeitigen Schwankungen unterworfen. Besonders große Veränderungen erfährt er durch den Wechsel von Kälteperioden (Eiszeiten) – in denen ein großer Teil des auf der Erde vorhandenen Wassers in großen Eismassen gebunden ist – und Warmzeiten mit relativ kleinen Eiskappen an den Polen und einem starken Rückgang der Inlandgletscher. Während der letzten Eiszeit, der Weichseleiszeit, die ihren Höhepunkt vor etwa 25 000 Jahren hatte, lag der Meeresspiegel um mehr als 100 Meter tiefer als heute. Mit der allmählichen Erwärmung der Lufthülle und des Meeres stieg der Meeresspiegel an. Dieser Anstieg verlief bis etwa 7000 Jahre vor heute relativ steil und hat sich dann verlangsamt. Dabei ist es innerhalb der letzten 7000 Jahre immer wieder zu mehr oder weniger ausgeprägten Schwankungen gekommen, Wärmeperioden mit relativ hohem Meeresspiegel wurden von kälteren Perioden – auch „kleine Eiszeiten“ genannt – mit relativ niedrigem Meeresspiegel abgelöst. Da die Amplituden solcher Schwankungen des Meeresspiegels relativ klein sind, sie liegen im Bereich von 1 bis 2 Metern in Zeitabschnitten von 500 bis 1000 Jahren, treten sie nicht sehr augenfällig in Erscheinung und werden auch durch andere Effekte überlagert.

In der Gegenwart leben wir in einer Zeit steigenden Meeresspiegels. Allgemein wird angenommen, daß der „Mean Sea Level“ (MSL) gegenwärtig etwa 15 cm im Jahrhundert ansteigt. Der an verschiedenen Küsten zu beobachtende Anstieg des Wasserstandes ist davon verschieden. Auf den Wasserstand an der Küste wirken sich auch meteorologische Effekte aus, die einen Windstau verursachen können. An den Tideküsten ist das T_{hw} häufig besonders stark durch die Topographie des Küstenvorfeldes beeinflusst, wobei auch anthropogene Einwirkungen eine Rolle spielen. Daher wird der Wasserstandsanstieg an der Küste der Deutschen Bucht meistens durch den Anstieg des M_{Thw} ausgedrückt und nicht durch die Veränderung des eher dem MSL entsprechenden M_{Tmw}. An der deutschen Nordseeküste wird seit langem ein Anstieg des M_{Thw} von 25 cm im Jahrhundert als durchschnittlicher Wert angenommen. Ein solcher mittlerer Anstieg ist zu erkennen, seit Küstenpegel in Deutschland beobachtet werden. Er ist natürlich nie geradlinig verlaufen sondern war mehr oder weniger starken kürzerperiodischen Schwankungen unterworfen, und er ist auch an den einzelnen

Orten unterschiedlich groß. Aus historischen Wasserstandsangaben, insbesondere aus Höhenangaben von Sturmflutscheiteln, läßt sich schließen, daß das MThw an der deutschen Nordseeküste wahrscheinlich schon seit der Mitte des 16. Jahrhunderts im Mittel um 25 cm im Jahrhundert angestiegen ist. Das MThw hätte demnach etwa während des Höhepunktes der letzten sogenannten kleinen Eiszeit etwa 1 Meter tiefer gelegen als heute. In den wärmeren Jahrhunderten davor lag es höher, so daß man ein Minimum in der ausgeglichenen Ganglinie des MThw in der Mitte des 16. Jahrhunderts und ein Maximum um die letzte Jahrtausendwende annehmen kann.

Große Bedeutung hat die Frage der künftigen Entwicklung des MThw an den Küsten. Im ersten Quartal des 20. Jahrhunderts war eine Verflachung der ausgeglichenen Ganglinie des MThw zu erkennen, die sich bis in die 60er Jahre fortsetzte. Man konnte daher die vorsichtige Hoffnung hegen, daß langfristig ein Rückgang der Wasserstände an der Küste erfolgen würde, der der Beginn einer kleinen oder sogar einer großen Eiszeit hätte sein können. Seit der Mitte der 60er Jahre ist jedoch eine gegenläufige Entwicklung erkennbar, das MThw steigt wieder stärker an. Dieser Anstieg des MThw war stärker und vor allem länger anhaltend, als in der Zeit, aus der regelmäßige Pegelbeobachtungen vorliegen, bisher beobachtet worden ist. Trotz dieses stärkeren Anstiegs ist der mittlere Anstieg von 25 cm pro Jahrhundert für das bisher abgelaufene 20. Jahrhundert noch nicht überschritten, weil der Anstieg in den ersten Jahrzehnten unseres Jahrhunderts relativ gering war. Der zu erkennende stärkere Anstieg verpflichtet jedoch die Verantwortlichen zu einer erhöhten Wachsamkeit! Der stärkere Anstieg des MThw wird in den letzten Jahrzehnten durch ein Absinken des MTnw begleitet, so daß damit eine allgemeine Vergrößerung des MThb an der deutschen Nordseeküste zu verzeichnen ist. Während man das starke Absinken des MTnw in den Ästuaren und Tideflüssen zum großen Teil auf Ausbaumaßnahmen zurückführen kann, trifft diese Erklärung für die Wasserstände an der Küste nicht zu.

In den letzten Jahrzehnten wird von Klimatologen auf die Möglichkeit einer weltweiten Klimaänderung hingewiesen, die sich aus dem sogenannten Treibhaus- oder Greenhouseeffekt ergibt. Infolge des verstärkten Verbrauchs fossiler Energieträger, aber auch durch das Abbrennen tropischer Wälder ist der CO_2 -Gehalt der Atmosphäre stark angestiegen und steigt weiter an. Dazu kommt die Wirkung einer weiteren Verschmutzung der Atmosphäre z.B. durch Treibgase. Man erwartet dadurch innerhalb des nächsten Jahrhunderts eine mittlere Erwärmung der Atmosphäre um etwa 4°C , die natürlich einen Einfluß auf den Meeresspiegel haben wird infolge der Volumenvergrößerung durch steigende Wassertemperaturen oberflächennaher Schichten, des Abschmelzens von Festlandgletschern und eventuell durch das Abgleiten großer antarktischer Eismassen ins Meer. Eine genaue Voraussage der Klima- und Temperaturentwicklung ist z.Zt. nicht möglich, es gibt auch gegenteilige Ansichten über die künftige Klimaentwicklung. Endgültige Aussagen werden wohl frühestens in einigen Jahren gemacht werden können, wenn die Ergebnisse weltweiter Forschungsprojekte vorliegen. In der Zwischenzeit darf man aber nicht tatenlos abwarten. Von mehreren Forschergruppen sind Modellrechnungen ausgeführt worden, durch die ermittelt worden ist, wie sich eine Erwärmung der Atmosphäre auf den Anstieg des Meeresspiegels auswirken wird. Eine sehr detaillierte Untersuchung ist u.a. von der Umweltschutzbehörde der USA veranlaßt worden, deren Ergebnis 1984 veröffentlicht wurde (B. Titus u.a.: Greenhouseeffekt and Sea Level Rise – a Challenge for this Generation; New York 1984). Je nach den für die einzelnen Berechnungen getroffenen Annahmen liegt der Anstieg des MSL zwischen 56 und 345 cm bis zum Jahr 2100. Der Anstieg des MThw an den Küsten dürfte in der Regel noch größer sein. Der Anstieg des MSL vollzieht sich nach den genannten Modellrechnungen in den ersten Jahrzehnten noch recht langsam, erst innerhalb der ersten Jahrzehnte nach der

Jahrtausendwende erreicht der Anstieg gefährliche Ausmaße. Wie die Entwicklung danach weitergeht, bleibt völlig offen. Ein weiterer Meeresspiegelanstieg ist durchaus möglich. Sollte sich jedoch der Trend zu einer neuen „Großen Eiszeit“ hin entwickeln, so wird sich dessen Auswirkung auf den Meeresspiegel gegen einen durch eine anthropogen beeinflusste Klimaentwicklung verursachten Wasserstandsanstieg durchsetzen. Dadurch wird es im Laufe der folgenden Jahrtausende wieder zu einem Absinken des Meeresspiegels in der Größenordnung von mehr als 100 Metern kommen können. Demgegenüber liegt der theoretisch maximale Meeresspiegelanstieg bei etwa 60 m, falls das gesamte Festlandeis der Erde schmelzen würde.

Vor dem Hintergrund der Ergebnisse der Modellrechnungen für einen künftigen Anstieg des Meeresspiegels gewinnt die o.a. an den Küstenpegeln beobachtete Entwicklung des MThw eine besondere Bedeutung. Es ist nicht auszuschließen, daß der in den letzten Jahrzehnten beobachtete verstärkte Anstieg des MThw bereits der Beginn der Entwicklung ist, die die erwähnten Modellrechnungen zeigen. Mit Sicherheit läßt sich das jedoch nicht sagen, es ist durchaus auch möglich, daß es in den nächsten Jahren wieder zu einem geringeren Ansteigen des MThw oder sogar zu einem Absinken kommt. Auf jeden Fall ist es geboten, die Entwicklungen genau zu beobachten und sich die Auswirkungen besonders ungünstiger Entwicklungen nebst den erforderlichen Gegenmaßnahmen rechtzeitig im voraus zu überlegen, um nicht von solchen Entwicklungen überrollt zu werden. Schon in dem o.a. Werk von TITUS u. a. sind in mehreren Fallstudien die Auswirkungen eines verstärkten Meeresspiegelanstiegs für zwei Gebiete in den USA – das Gebiet von Charlestone im Staat South Carolina und Galvestone in Texas – untersucht worden. Eine entsprechende Studie wurde auch in den Niederlanden bearbeitet, deren gesamtes Staatsgebiet schon zum heutigen Meeresspiegel verhältnismäßig tief liegt. Diese Studie ist vom Dienst für Küstengewässer des Rijkswaterstaat erarbeitet worden und hat den Titel „ZEESPIEGELRIJZING-Worstelen met wassend water“ – (Nota: GWAO-86.002). Die nachfolgende Arbeit ist eine ins Deutsche übertragene Kurzfassung dieser Studie. Dabei wird ein Anstieg des Wasserspiegels der Nordsee von 5 m innerhalb der nächsten 200 Jahre angenommen, ohne darauf einzugehen, ob eine solche Entwicklung realistisch ist oder nicht. Man hat bewußt eine derartig extreme Entwicklung angenommen, um die Tendenzen der Auswirkungen besser zu erkennen, als es bei einem geringeren, aber wahrscheinlicheren Ansteigen des Meeresspiegels möglich wäre.

Das KFKI, in dem alle Wasserbauverwaltungen des Bundes und der Küstenländer zusammenarbeiten, verfolgt die sich abzeichnende Möglichkeit der künftigen Wasserstandsentwicklung mit großem Interesse. Eine von ihr eingesetzte Projektgruppe hat mit einer genauen Analyse der Wasserstandsentwicklung an der deutschen Nord- und Ostseeküste begonnen. Der BMFT fördert Forschungsprojekte von Universitätsinstituten, in denen die Veränderung der Tide in der Nordsee und die Wasserstandsentwicklung an den deutschen Küsten bei steigendem Meeresspiegel untersucht werden sollen. Zudem beobachtet die genannte Projektgruppe die zu diesem Thema angestellten Überlegungen und Untersuchungen im Ausland. Auch in der Bundesrepublik Deutschland müssen in naher Zukunft noch intensivere Überlegungen angestellt werden, welche hydrologischen Auswirkungen durch einen in den nächsten Jahrzehnten sich verstärkenden Meeresspiegelanstieg in den verschiedenen Regionen des deutschen Küstengebiets zu erwarten sind. Daran anschließend muß untersucht werden, welche Konsequenzen – technische, wirtschaftliche und politische – sich aus solchen Änderungen der hydrologischen Verhältnisse ergeben. Für solche Überlegungen bleibt gegenwärtig noch ausreichend Zeit, da der Wasserstandsanstieg noch relativ langsam verläuft und die rechnerischen Reserven, die z.B. in der Bemessung der Küstenschutzwerke stecken, noch nicht aufgezehrt sind. Es ist aber auch nicht zu früh, derartige Überlegungen anzustellen, denn man muß schon in naher Zukunft Entscheidungen über Investitionen für

Maßnahmen treffen, die noch am Ende des nächsten Jahrhunderts funktionsfähig sein sollen. Daher hat das KFKI u. a. auch eine enge Zusammenarbeit mit den Niederlanden beschlossen, eine bilaterale Vereinbarung darüber wurde inzwischen getroffen. Sie sieht vor, sich gegenseitig über Forschungsvorhaben zu unterrichten, Daten auszutauschen und ggfs. gemeinsame Forschungsvorhaben zu betreiben. Mit der Veröffentlichung der folgenden Arbeit soll gezeigt werden, welche intensiven Überlegungen in den Niederlanden bereits angestellt wurden, um damit zu entsprechenden Untersuchungen in der Bundesrepublik Deutschland anzuregen.

Hans Rohde

1. Einleitung

Es bedarf keiner besonderen Erklärung, daß ein starker Meeresspiegelanstieg für ein Land wie die Niederlande viele große Probleme mit sich bringt. In der Literatur werden für den Meeresspiegelanstieg innerhalb der nächsten hundert Jahre Werte zwischen ungefähr zwanzig und zweihundert Zentimetern genannt. Um ein Gefühl für die Problematik zu bekommen, ist beschlossen worden, für die vorliegende erste Studie von einer sehr extremen Situation auszugehen, nämlich von einem Anstieg des Wasserspiegels der Nordsee von 5 Metern innerhalb der nächsten 200 Jahre. Weitere Gründe, die zur Ausarbeitung dieser Studie beitragen, sind:

- Für den Fall, daß ein stärkerer Meeresspiegelanstieg als bisher sich weiterhin durchsetzen sollte, sind frühzeitige Informationen über potentielle Auswirkungen sowie Vorschläge für entsprechende Gegenmaßnahmen von größtem Interesse. Es ist daher notwendig, von Voraus-Annahmen auszugehen, weil Vorbereitung und Ausführung von umfassenden Maßnahmen mehrere Jahrzehnte in Anspruch nehmen.
- Falls große Eingriffe als notwendig erachtet werden sollten, müssen Maßnahmen, die über kurz oder lang getroffen werden müssen, um Auswirkungen eines nicht-anthropogen bewirkten Meeresspiegelanstiegs aufzufangen, in ihrer Gesamtheit eingeschätzt werden.

Im Hinblick auf die Relation zwischen dem Meeresspiegelanstieg und heutiger sowie künftiger Forschungen sind einige relativierende Anmerkungen angebracht: Zum ersten weichen die Prognosen über die künftige Meeresspiegelveränderung sehr voneinander ab. Ausgehend von den Annahmen, die den Prognosen zugrundeliegen, variieren die anthropogen bewirkten Meeresspiegelschwankungen in den kommenden Jahrhunderten zwischen einem geringen bis extremen Anstieg (letzterer beim Auftreten von Instabilität des sog. westantarktischen Eises). Das große Interesse, das bereits weltweit an Studien über Auswirkungen und Lösungsmöglichkeiten eines großen relativen Meeresspiegelanstiegs besteht, muß nicht dazu führen, daß ein Trendbruch, der zu einem derartig extremen Anstieg führt, als Axiom angesehen wird. Angesichts der zeitlichen Dimension des Problems muß ein wesentlicher Anteil der Forschungsanstrengungen auf die Untermauerung und Präzisierung der Prognose ausgerichtet sein. Ebenso ist es wichtig, welcher Anteil einer solchen Veränderung vom Menschen verursacht wird. Dies kann unter anderem dazu führen, daß ein extremer Meeresspiegelanstieg nicht als unabänderlich akzeptiert wird, sondern daß weltweit nach Gegenmaßnahmen gesucht wird.

In den Kapiteln 2 bis 7 wird versucht, eine Reihe verschiedener Auswirkungen aufzuführen. Dabei ist der Ausgangspunkt ein Anstieg des Meeresspiegels von 5 m in etwa 200 Jahren, wobei die Niederlande in der derzeitigen Größe erhalten bleiben sollen. Implizit wird dabei unterstellt, daß dafür notwendige Maßnahmen ergriffen worden sind. Kapitel 8 behandelt Lösungsmöglichkeiten, wobei Sicherheit und Erhalt des Landes garantiert werden, als auch Naturfunktionen von Landschaften, z. B. des Wattenmeeres, erhalten bleiben.

Obwohl in mehreren Kapiteln zwar genannt, wird den Folgen eines Meeresspiegelanstiegs für den Wasserhaushalt der Niederlande wenig Aufmerksamkeit geschenkt. Das bedeutet nicht, daß das Problem von den Autoren verkannt wird. Die Aspekte des Wasserhaushalts sind unlängst in einer anderen Studie behandelt worden.

2. Die Veränderung der Wasserbewegung in der Nordsee

2.1 Einleitung

In diesem Kapitel wird der Frage nachgegangen, welche Auswirkungen ein um 5 m höherer Meeresspiegel auf die astronomische Gezeitenbewegung einerseits und andererseits auf den Wasserstandsverlauf während einer Sturmflut zur Folge hat. Die Untersuchungen wurden mit Hilfe des unlängst entwickelten Continental Shelf Model vorgenommen, einem zweidimensionalen Wasserbewegungsmodell der Nordsee und der kontinentalen Platte. Die äußeren Grenzen des Modells zeigt Abb. 2.1. Es wurde dabei angenommen, daß die Randbedingungen und die Bodenreibungskoeffizienten konstant bleiben.

2.2 Veränderungen in der Gezeitenbewegung

Größere Wassertiefen in der Nordsee (entlang der niederländischen Küste nimmt die Wassertiefe relativ stark zu) haben Einfluß auf die Fortpflanzung der Flutwelle in der Nordsee:

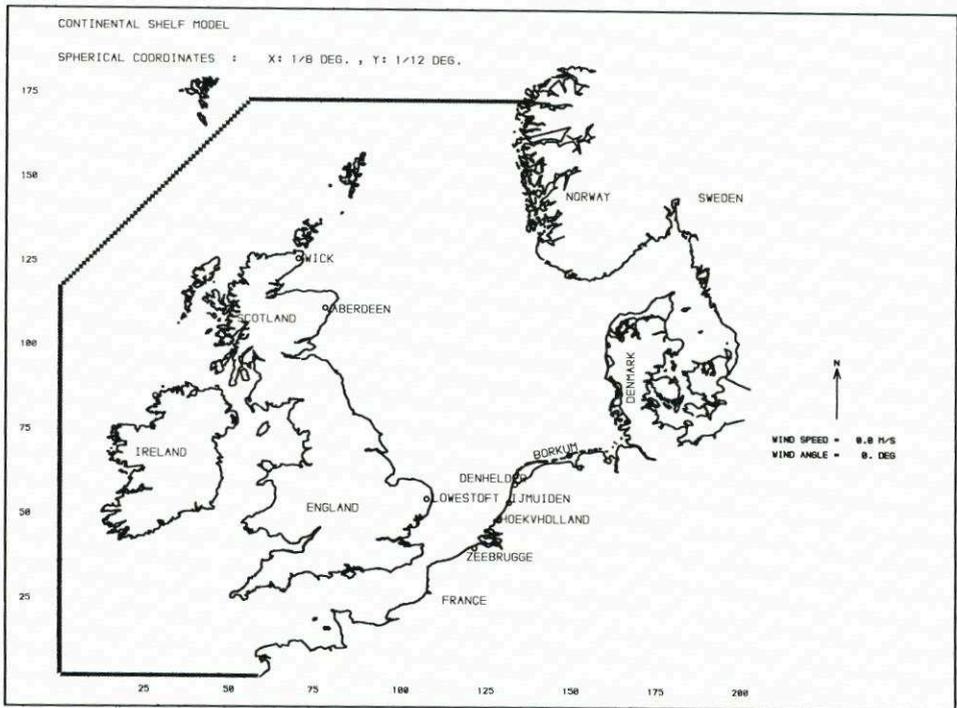


Abb. 2.1. Das Continental Shelf Model

- Die Flutwelle beschleunigt sich; daraus ergibt sich ein früheres Eintreffen.
- Die Amplituden der Gezeitenkomponenten steigen.
- Die amphidromischen Punkte werden verschoben. Durch diese Verschiebung steigen oder fallen die Amplituden an einem bestimmten Ort, je nachdem, ob der amphidromische Punkt weiter ab bzw. näher daran liegt.

Aus den Berechnungen mit dem Continental Shelf Model wird folgendes deutlich (Abb. 2.2):

- Schon bei Wick (Nordost-England) ist eine Veränderung der Gezeiten durch eine geringe zeitliche Verschiebung der Scheitelwerte und eine Zunahme des Tidehubs um 6 % festzustellen.
- In der südlichen Nordsee und entlang der niederländischen Küste treten die Scheitelwerte etwa 1 Stunde früher ein.
- Der Tidehub entlang der englischen Küste ab Aberdeen und entlang der belgischen und niederländischen Küste südlich von Scheveningen nimmt durchschnittlich um 15 % zu. Das mittlere Hochwasser steigt dabei um 1-2 Dezimeter.
- In der Höhe Den Helder nimmt der Tidehub um 14 % ab, während er an der niederländisch-deutschen Grenze bei Borkum wieder um etwa 20 % zunimmt.

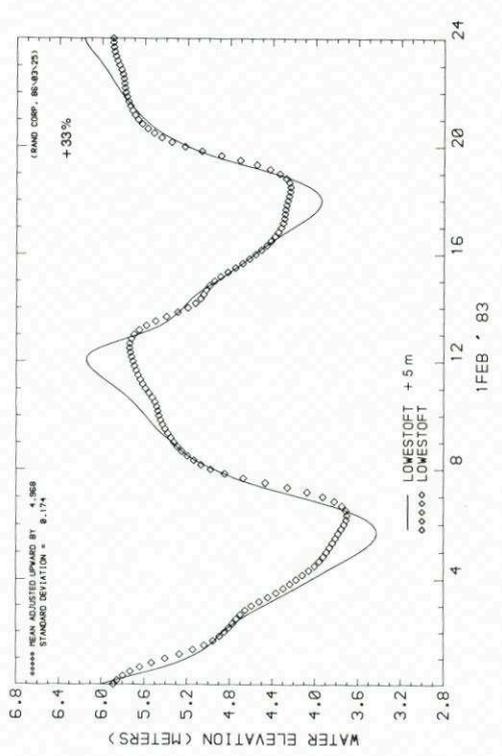
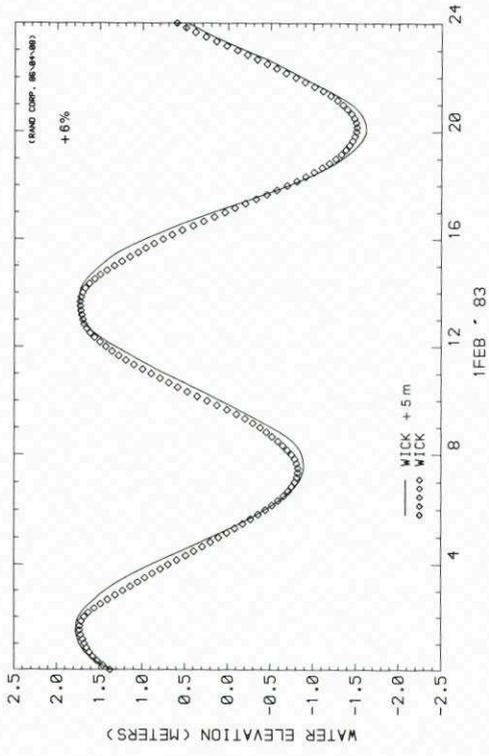
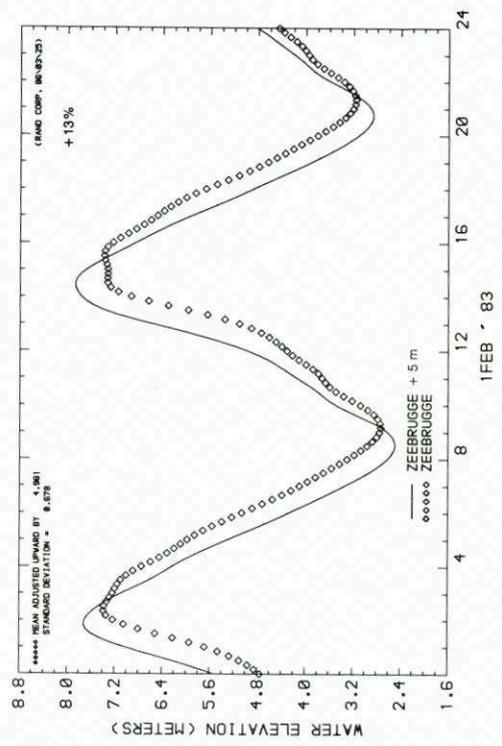
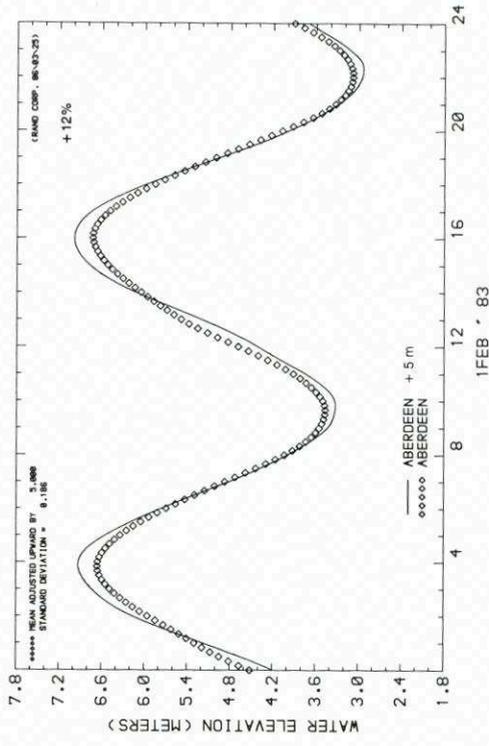
Abb. 2.3 verdeutlicht die Zunahme des Tidehubs in der südl. Nordsee, die sich überwiegend aus der Verschiebung der Amphidromie der halbtägigen Gezeiten ergibt. Abb. 2.4 zeigt deutlich die Verschiebung der Amphidromie in nordöstlicher Richtung, etwa in Richtung Den Helder, was die Abnahme des dortigen Tidehubs erklärt. Der Abstand zwischen IJmuiden und der Amphidromie bleibt ungefähr gleich, ebenso der Tidehub. Für die weiter südlich gelegenen Stationen nimmt die Entfernung zu und damit auch der Tidehub. Die Isophasenlinien in der Abb. 2.4 lassen die schnellere Fortpflanzung der Gezeiten an der niederländischen Küste erkennen.

In Abb. 2.5 wird die Verschiebung der Amphidromie der vierteltägigen Gezeitenkomponenten nach Norden deutlich, was steigende Amplituden entlang der südlichen und mittleren niederländischen Küste zur Folge hat. In Hoek van Holland und IJmuiden (Abb. 2.2) ist demzufolge eine deutliche Zunahme des Agger* festzustellen. Auch die Komponente der eintägigen Gezeiten zeigt einen geringen Anstieg der Amplitude.

Abschließend ist noch auf ein merkwürdiges Phänomen hinzuweisen, nämlich auf die Zunahme des Tidehubs in Lowestoft (33 %). Der Wasserstandsverlauf bei Lowestoft zeigt in der heutigen Situation einen ziemlich flachen Verlauf der Tidekurve im Bereich des Hoch- bzw. Niedrigwassers. In der +5-m-Situation verläuft die Tidekurve in den Scheitelbereichen dagegen sehr spitz. Möglich wäre folgende Erklärung:

In der heutigen Situation sind die halb- und vierteltägigen Gezeitenkomponenten in bezug aufeinander so in Phase, daß sie während Hoch- bzw. Niedrigwasser einander entgegenwirken. Dagegen sind sie in der +5-m-Situation zueinander verschoben, so daß sich ihre Wirkung besonders während des Hoch- bzw. Niedrigwassers addiert. Diese Erklärung kann auch als Möglichkeit für Hoek van Holland angesehen werden (Zunahme des Tidehubs um 21 %).

* Agger: ziemlich starker, doch kurzzeitiger Anstieg des Meereswasserspiegels während der Ebbe; eine eigenartige Erscheinung in der Nähe von Hoek van Holland, vor allem in Springtiden.



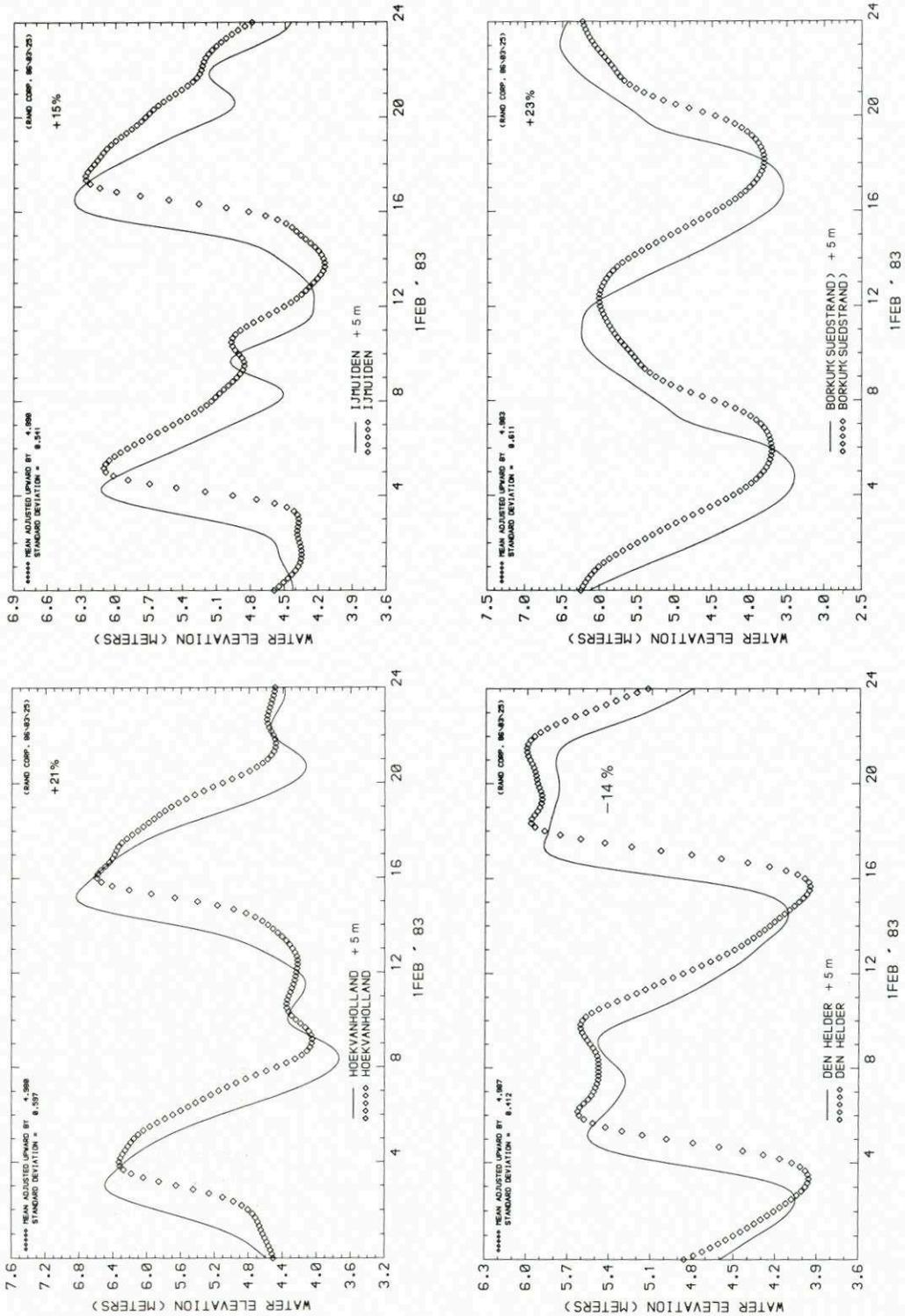


Abb. 2.2. Tidekurven für mehrere Orte an der Nordseeküste vor und nach einem Anstieg des Meeresspiegels von 5 m (5-m-Situation um 5 m abgesenkt dargestellt)

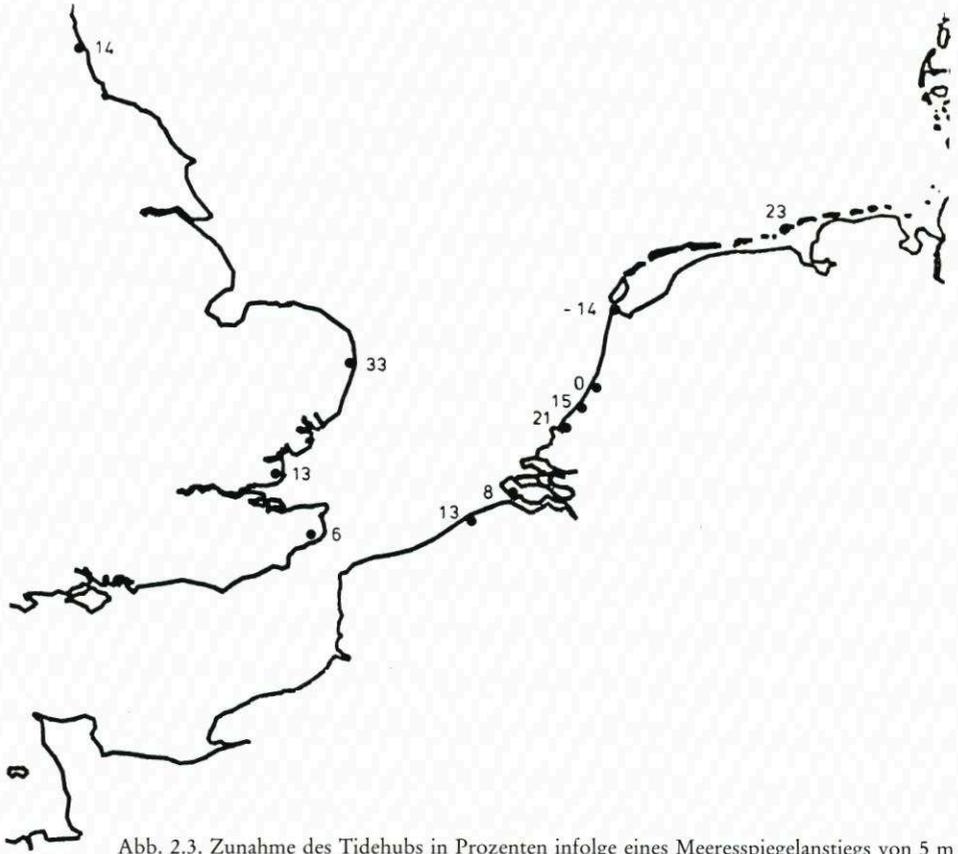


Abb. 2.3. Zunahme des Tidehubs in Prozenten infolge eines Meeresspiegelanstiegs von 5 m

2.3 Veränderungen der Tidekurven bei Sturmfluten

Mit Hilfe des Continental Shelf Models ist die Sturmflut vom 1./2. Februar 1983 auf der Basis eines um 5 m höheren Meeresspiegels nachgerechnet worden. Bei keiner der untersuchten Stationen beträgt die Hochwassererhöhung in der +5-m-Situation mehr als einen halben Dezimeter gegenüber der heutigen Situation, in vielen Fällen liegen die Hochwasserscheitel sogar niedriger. Abb. 2.6 und 2.7 zeigen den Wasserstandsverlauf von Hoek van Holland und IJmuiden, wobei zum besseren Vergleich der Kurven in der +5-m-Situation die Null-Linie 5 m tiefer gelegt wurde. Das erste Sturmfluthochwasser bei Hoek van Holland steigt um 22 cm höher an als vergleichsweise am 1./2. Februar 1983, was jedoch größtenteils durch die Vergrößerung des Tidehubs und dem dadurch höheren astronomischen Hochwasser verursacht wird (etwa 17 cm nach Abb. 2.2). Der Hochwasseranstieg hat hier demzufolge nur etwa 5 cm zugenommen. Beim zweiten Sturmfluthochwasser bei Hoek van Holland ist der Hochwasseranstieg ungefähr um $4 + 17 = 21$ cm niedriger. Sturmfluten verändern sich also kaum oder gar nicht.

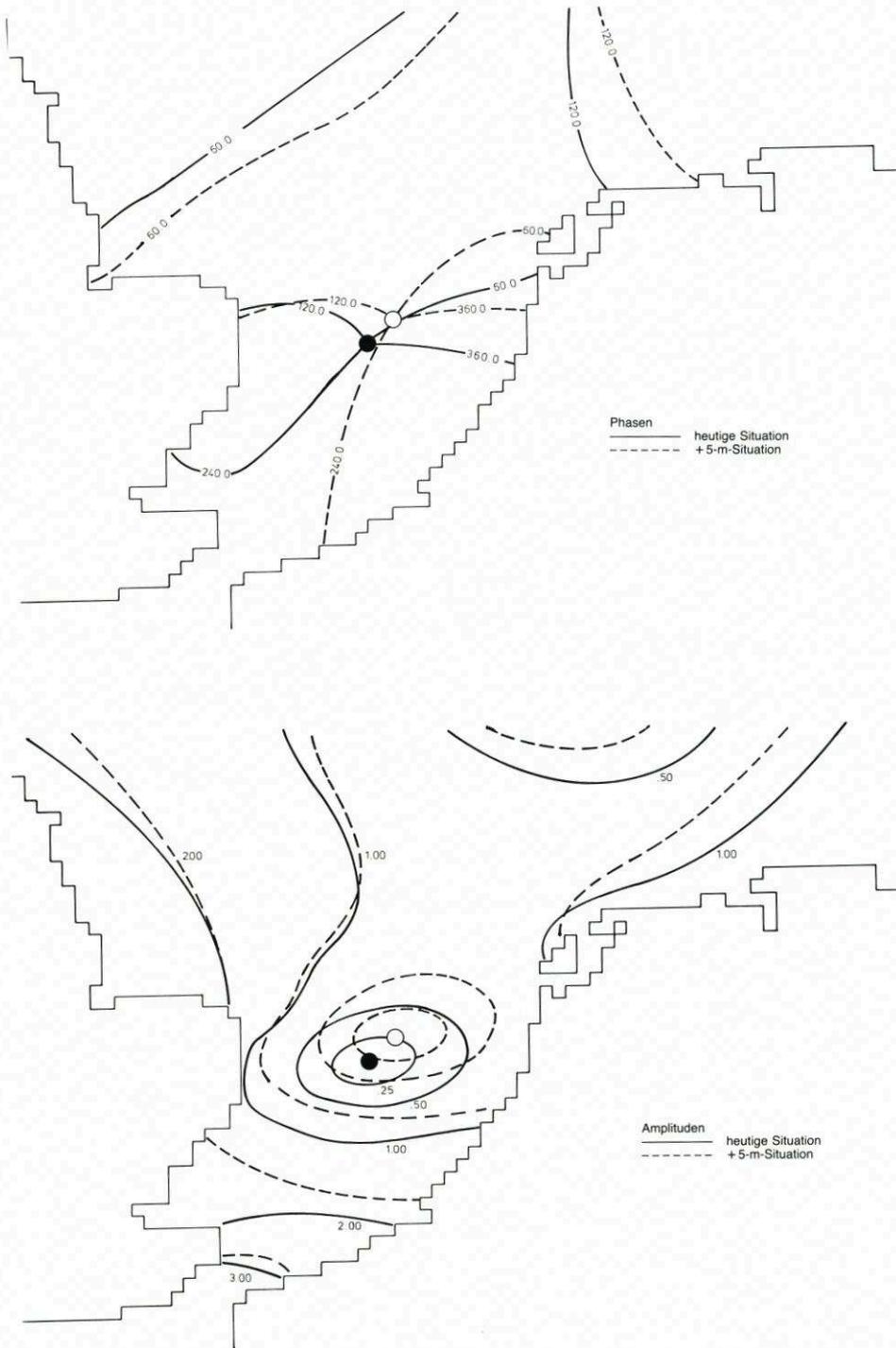


Abb. 2.4. Linien gleicher Phasen und gleicher Amplituden der halbtägigen Gezeiten

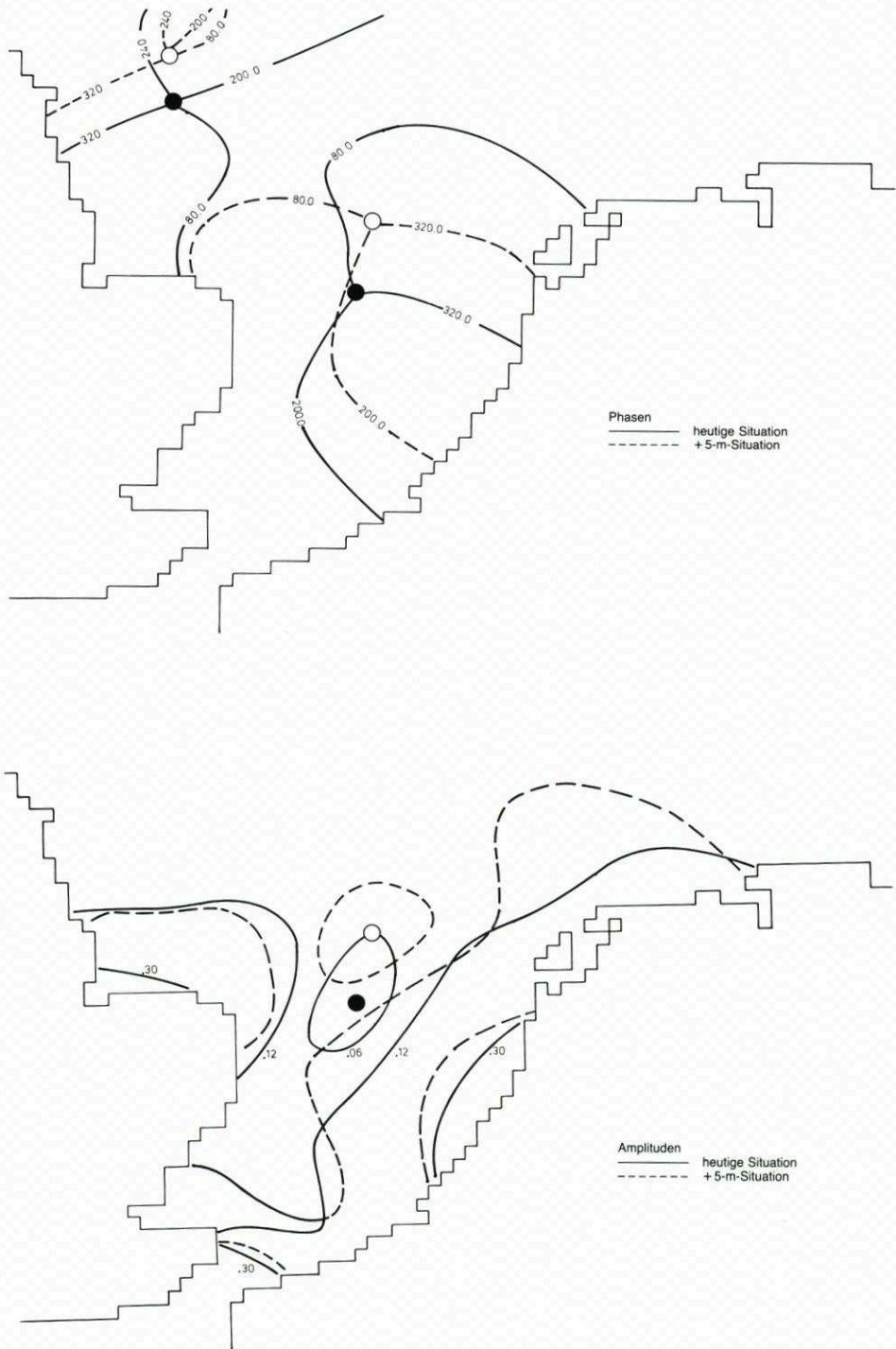


Abb. 2.5. Linien gleicher Phasen und Amplituden der vierteltägigen Gezeiten

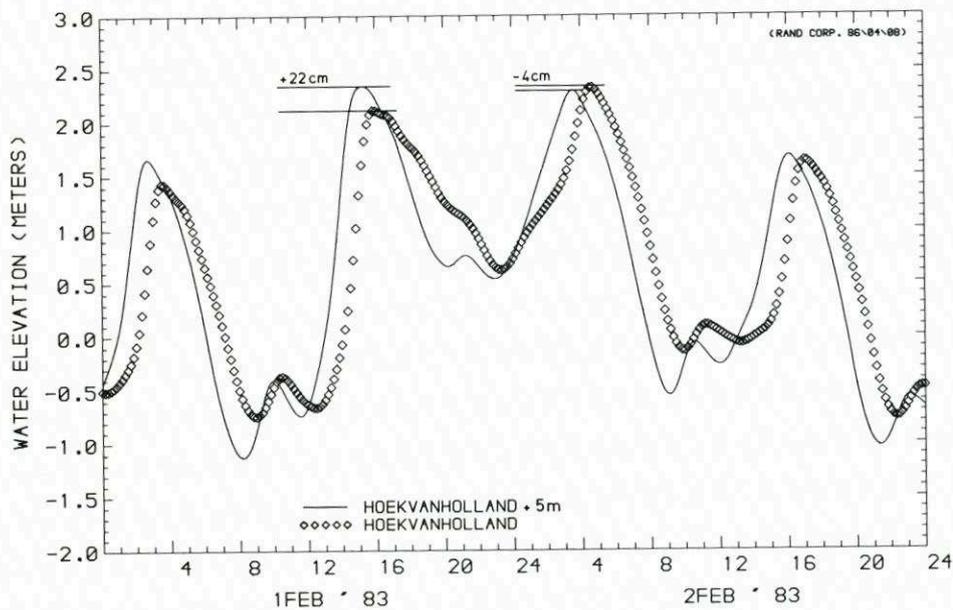


Abb. 2.6. Tidekurven der Sturmflut vom 1./2. Feb. 1983 für Hoek van Holland (+ 5-m-Situation um 5 m abgesenkt)

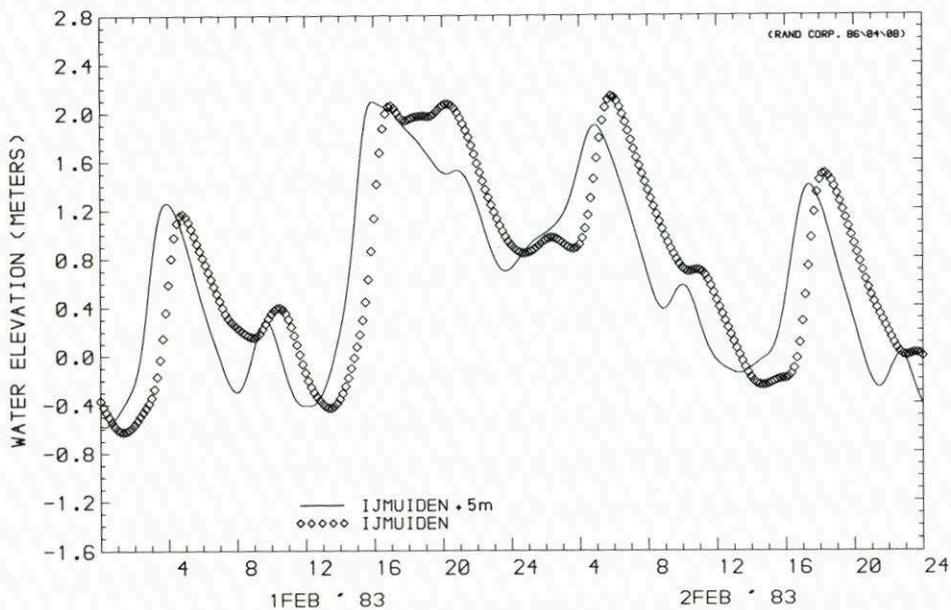


Abb. 2.7. Tidekurven der Sturmflut vom 1./2. Feb. 1983 für Ijmuiden (+ 5-m-Situation um 5 m abgesenkt)

3. Veränderung des Salzgehalts in den niederländischen Ästuaren

3.1 Einleitung

Ein Anstieg des mittleren Meeresspiegels hat für die Ästuare und Flüsse in erster Linie eine Zunahme der Wassertiefe zur Folge. Das bedeutet, daß die Gezeiten weiter landeinwärts vordringen. Das daraus resultierende Flutvolumen hat nicht ohne weiteres eine Zunahme der Strömungsgeschwindigkeiten zur Folge, da auch der Durchflußquerschnitt zunimmt. Die Turbulenz wird sich dann ebenfalls wenig verändern, so daß sich die Durchmischung, die für das Eindringen von Salzwasser gleichfalls von Bedeutung ist, wenig verändern wird. Meistens wird davon ausgegangen, daß der Dispersionskoeffizient als Folge der Gravitationszirkulation proportional dem Quadrat der Tiefe ist. Bei Zunahme der Tiefe nimmt demzufolge das Eindringen von Salzwasser schnell zu. Der Anstieg des mittleren Meeresspiegels bedeutet dann gleichfalls auch eine Erhöhung des Salzgehalts.

Stillschweigend wird davon ausgegangen, daß der Boden des Ästuars nicht gleichzeitig mit dem Meeresspiegel ansteigt. Im Hinblick auf den Sedimenttransport der Flüsse braucht diese Annahme keineswegs zutreffend zu sein. In der Extremsituation, in der der Sohlenanstieg mit dem Wasserspiegelanstieg Schritt hält, werden Tideablauf und Salzgehalt keinen Veränderungen unterliegen. Da der Tidehub bei Hoek van Holland zunimmt, wird dort der Salzgehalt sogar abnehmen. (In der heutigen Situation ist die Salzgehaltszunahme während der Springtide geringer als während der Nipptide.) Um eine Vorstellung von den möglichen Veränderungen des Salzgehalts zu gewinnen, wird unterstellt, daß die Sohle nicht gleichfalls steigt. Dazu sind einige Berechnungen durchgeführt worden.

3.2 Berechnungen und Randbedingungen

Bei den Berechnungen wurde ein 1D-advectives Diffusionsmodell verwendet. Es muß angemerkt werden, daß das angewandte Dispersionskonzept die heutigen Dichteverhältnisse gut beschreibt, daß jedoch unter gänzlich anderen Bedingungen das Konzept wahrscheinlich als unzureichend angesehen werden muß, so daß daher die Berechnungen nur indikativ sind.

Die Berechnungen sind mit zwei Randbedingungen in Hoek van Holland in Anlehnung an die Berechnungen mit dem Continental Shelf Model (Kap. 2) durchgeführt worden, und zwar für mittlere Meeresspiegel von 0 und 4,5 m. (Abweichend vom Ausgangspunkt ist ein Anstieg von 4,5 m gewählt, da die Geometrieschematisierung einen höheren Wasserstand nicht zugelassen hätte. Eine Anpassung der Schematisierung ist in der Kürze der gegebenen Zeit nicht möglich gewesen.)

Für den Rhein ist am Modellrand ein Abfluß von $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ angenommen worden. Dieser Rheinabfluß wird durchschnittlich nur während 6 % eines Jahres unterschritten.

3.3 Ergebnisse

Einige Beispiele für den vertikalen Gezeitenverlauf finden sich in den Abb. 3.1 und 3.2. Die Veränderungen sind so, wie sie bereits in den Randbedingungen vorzufinden sind: Flußaufwärts nimmt der Einfluß eines Meeresspiegelanstiegs naturgemäß ab, bei Tiel (ungefähr 100 km von der Küste entfernt) zeigt sich aber immer noch ein Anstieg von 2,5 m (bei einem Meeresspiegelanstieg von 5 m würde er demzufolge ca. 3 m betragen). Es kann

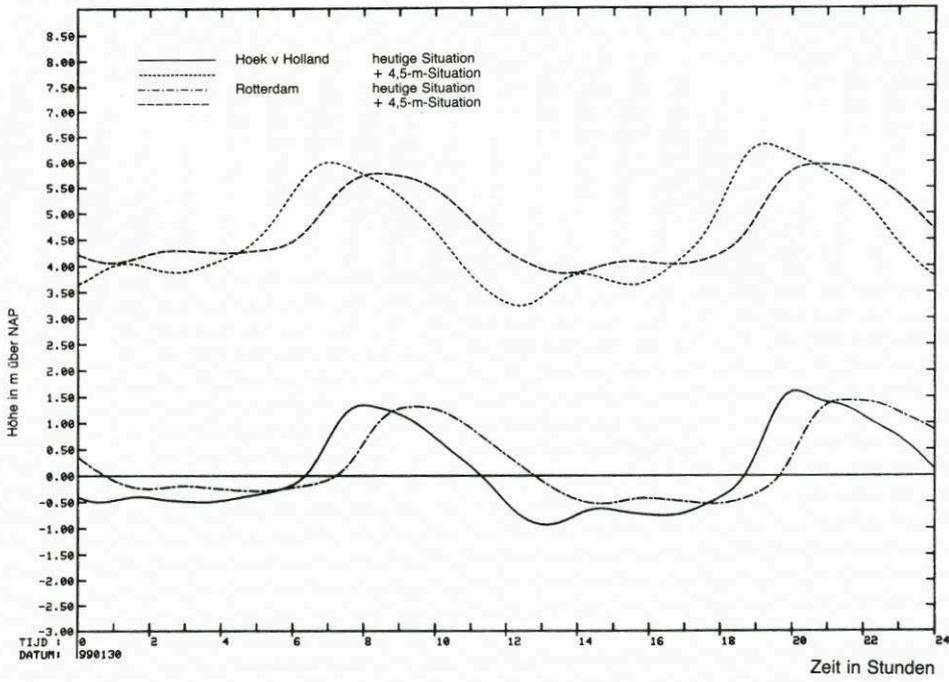


Abb. 3.1. Wasserstandsganglinien für Hoek van Holland und Rotterdam

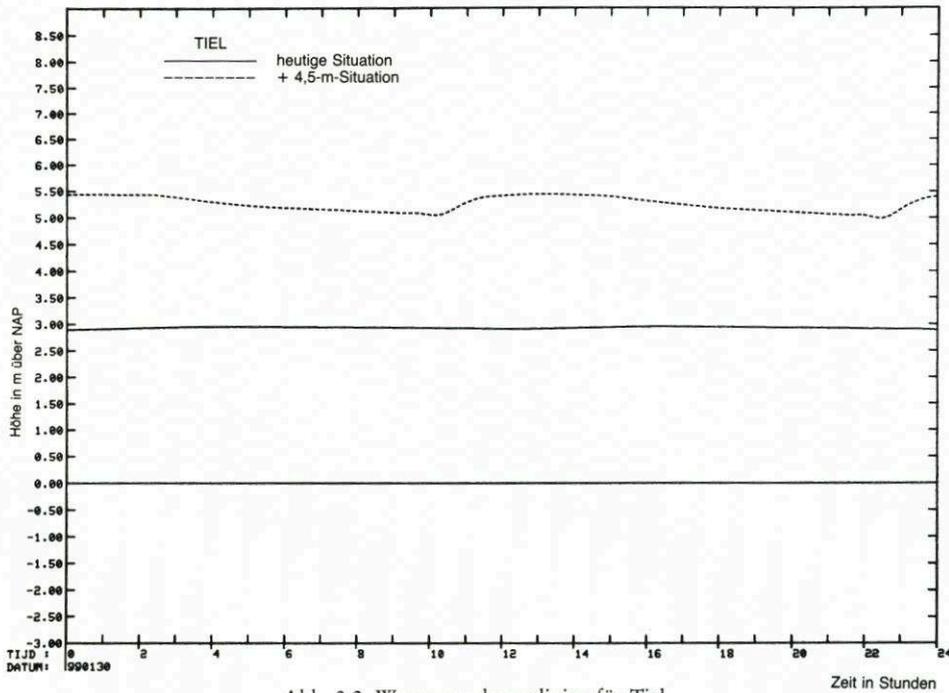


Abb. 3.2. Wasserstandsganglinien für Tiel

festgestellt werden, daß der Einfluß eines Meeresspiegelanstiegs bis in die Umgebung von Nijmegen (130 km von der Küste und 15 km von der deutschen Grenze entfernt) nachweisbar sein wird.

Abb. 3.3 zeigt die Ganglinien des Durchflusses im Nieuwe Waterweg in der Nähe von Hoek van Holland: Bei einer Vergrößerung des Durchflußquerschnitts um etwa 35 % nimmt der maximale Durchfluß bei Flutstrom um ca. 65 % zu, die Strömungsgeschwindigkeiten daher um etwa 30 %. Für den Salzgehalt bedeutet das

- eine Zunahme als Folge einer größeren Advektion,
- eine Zunahme als Folge der Gravitationszirkulation (größere Tiefe),
- eine Abnahme als Folge der Vermischung unter Einfluß größerer Strömungsgeschwindigkeiten.

Das Resultat wird in Abb. 3.4 verdeutlicht. Es ist der maximale Salzgehalt (Chloridkonzentration) innerhalb einer Tide über die Längserstreckung von Nieuwe Waterweg und Nieuwe Maas dargestellt. Abb. 3.5 zeigt entsprechend den minimalen Salzgehalt innerhalb einer Tide. Es ergibt sich daraus, daß an der Mündung der Hollandsche IJssel, über die die Süßwasserversorgung für die Mittel- und Westniederlande erfolgt, der Salzgehalt während der gesamten Tide größer wird als in der Gegenwart. Selbst an der Mündung des Lek nimmt der Salzgehalt während eines Teils der Tidedauer zu. Das Haringvliet bleibt gerade außerhalb der gefährlichen Zone. Die Ungenauigkeit der Resultate ist jedoch zu groß, um diese Behauptung mit Sicherheit aufrechtzuerhalten. In jedem Fall wird unter Sturmflutwirkung der Meereseinfluß im Haringvliet bemerkbar sein. Sowohl im Haringvliet als auch im Hollandsche Diep ist eine rückwärtige Versalzung zu erwarten (Abb. 3.6). Unter Berücksichtigung der langen Verweilzeiten im Hollandsche Diep und Haringvliet bei niedrigem Rheinabfluß werden beide nicht mehr als Süßwasserbecken bezeichnet werden können. Chloridkonzentrationen in Größenordnungen von 500 mg/l über einen längeren Zeitraum können nicht sicher ausgeschlossen werden.

4. Geohydrologische Folgen

4.1 Einleitung

Ein Meeresspiegelanstieg hat naturgemäß auch geohydrologische Folgen. In diesem Kapitel sollen die Auswirkungen auf die Grundwasserströmung behandelt werden. Besondere Aufmerksamkeit gilt den Veränderungen des „Kwel“ mit hoher Salzkonzentration und den Süßwasservorräten unter den Dünen. Nachdrücklich muß darauf hingewiesen werden, daß es sich hier um Berechnungen mit nur indikativem Charakter handelt. Für eine genauere Bestimmung der geohydrologischen Folgen wären weitere detaillierte Studien auf der Grundlage der genauen regionalen Verhältnisse vonnöten.

4.2 K wel

Unter K wel versteht man den Grundwasseraustritt infolge eines Druckhöhenunterschieds zwischen einer freien Wasseroberfläche und einem Grundwasserkörper*. In einer ersten Einschätzung kann der K wel von Salzwasser in relativ niedrig gelegenen Teilen der

* K wel entspricht etwa dem „Qualmwasser“, das in DIN 4047 Teil 2, Entwurf Januar 1987, als Wasser definiert ist, das durch den Untergrund eines Deiches in eine Niederung eintritt.

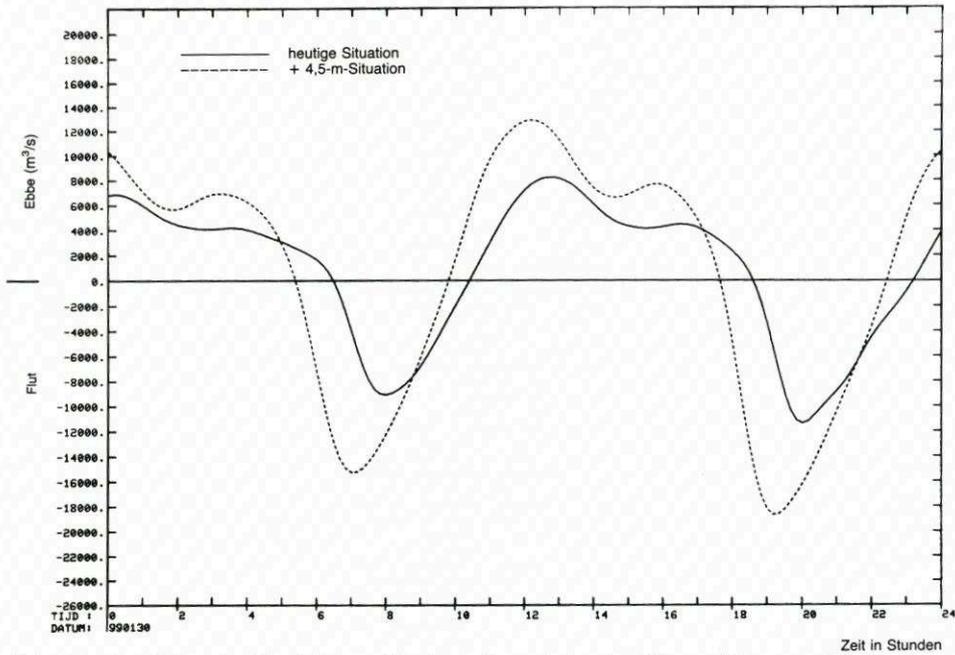


Abb. 3.3. Ganglinien des Durchflusses für einen Querschnitt des Nieuwe Waterweg bei Hoek van Holland

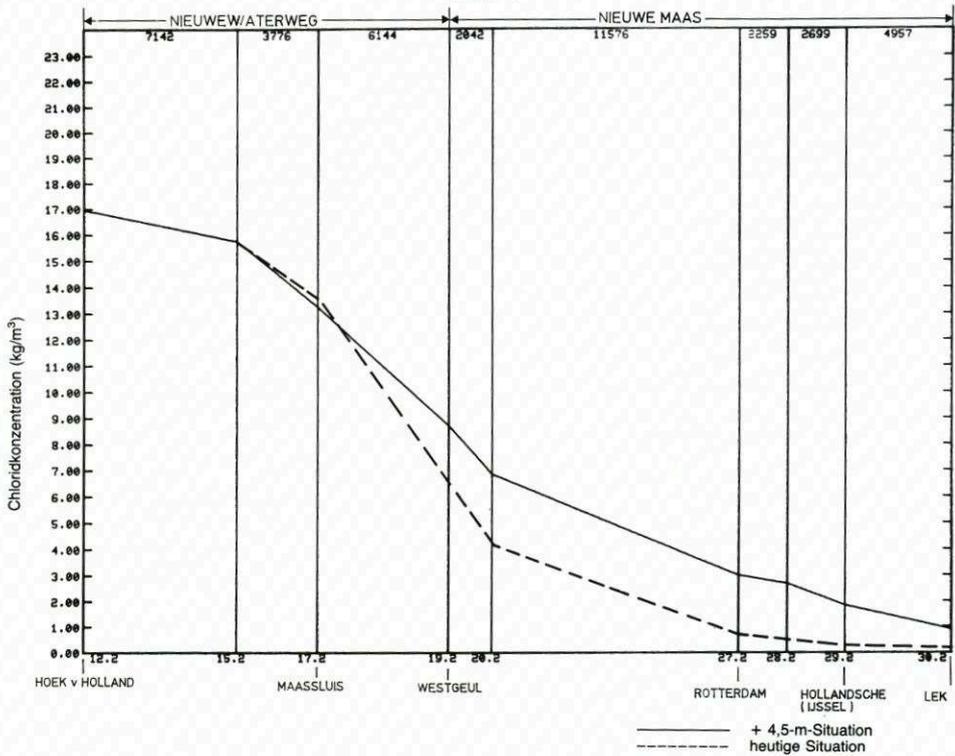


Abb. 3.4. Maximum des Salzgehalts innerhalb einer Tide im Nieuwe Waterweg und in der Nieuwe Maas

Niederlande in nicht allzu großer Entfernung zur Küste auch als proportional zu dem Unterschied zwischen dem Meeresspiegel und dem in einem Gebiet vorherrschenden Wasserstand angesehen werden. Daneben ist der Kwel umgekehrt proportional zu der Entfernung der untersuchten Region zur Küste. Weiter kann das horizontale Durchlaßvermögen (Trans-

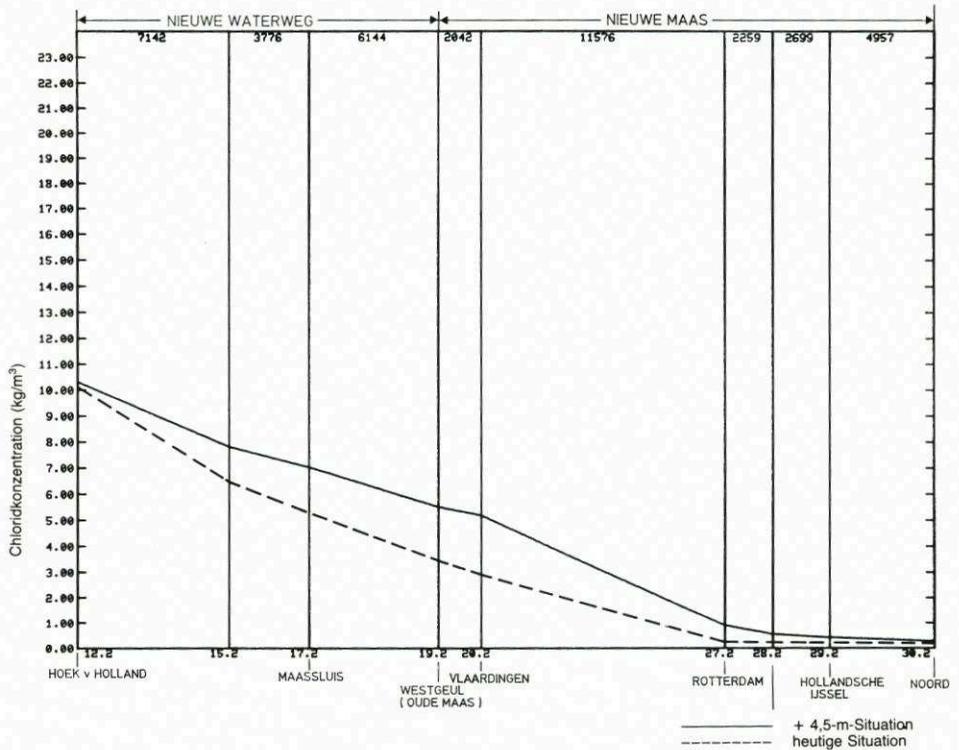


Abb. 3.5. Minimum des Salzgehalts innerhalb einer Tide im Nieuwe Waterweg und in der Nieuwe Maas

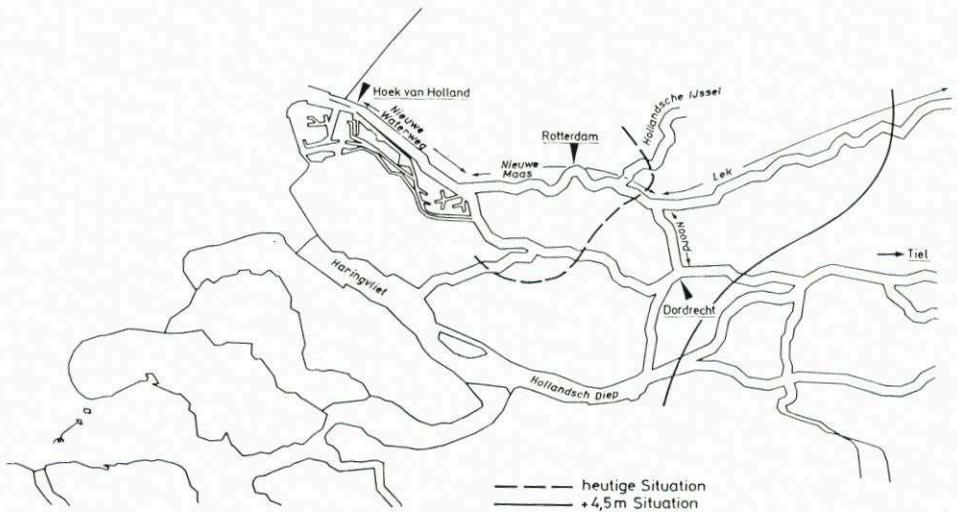


Abb. 3.6. Grenzen des Salzzutritts in das nördliche Deltabecken

missivität) des Untergrundes, das von dem Produkt der Durchlässigkeit und der repräsentativen Dicke des Durchflußprofils abhängt, eine bedeutende Rolle spielen. Daneben sind sicher auch das Vorkommen und die Dicke gering durchlässiger Schichten im Untergrund wichtige Faktoren, die bei Kwelberechnungen berücksichtigt werden müssen.

Von den o. a. Komponenten fällt bei einem erwarteten Meeresspiegelanstieg der Unterschied zwischen dem Meeresniveau und der Höhe des regionalen Wasserstands am deutlichsten ins Auge. Dieser Unterschied ist daher als Maßstab für eine erste globale Einschätzung der Auswirkungen eines Meeresspiegelanstiegs von 5 m auf den Kwel von Salzwasser zugrunde gelegt. In den niedrig gelegenen Gebieten der Niederlande mit einer Maifeldhöhe* zwischen 2 und 6 m unter NAP, wo momentan schon von einem substantiellen salzigen Kwel die Rede ist, wird die Intensität des Kwel von Salzwasser daher mit einem Faktor von 2 bis 3 zunehmen.

Abb. 4.1 gibt eine Übersicht der heutigen und der erwarteten zukünftigen Kwelsituation der Niederlande, bezogen auf die durchschnittlichen, von den Wasser- und Bodenverbänden ermittelten Werte. Bei verfeinerten Berechnungen sind bedeutende Abweichungen von den hier angegebenen Kwelwerten nicht ausgeschlossen. Deutlich wird daraus, daß z. Zt. in den IJsselmeerpoldern, im Wieringermeer und in Amstelland sowie im Bereich Dordrecht der meiste salzige Kwel erscheint.

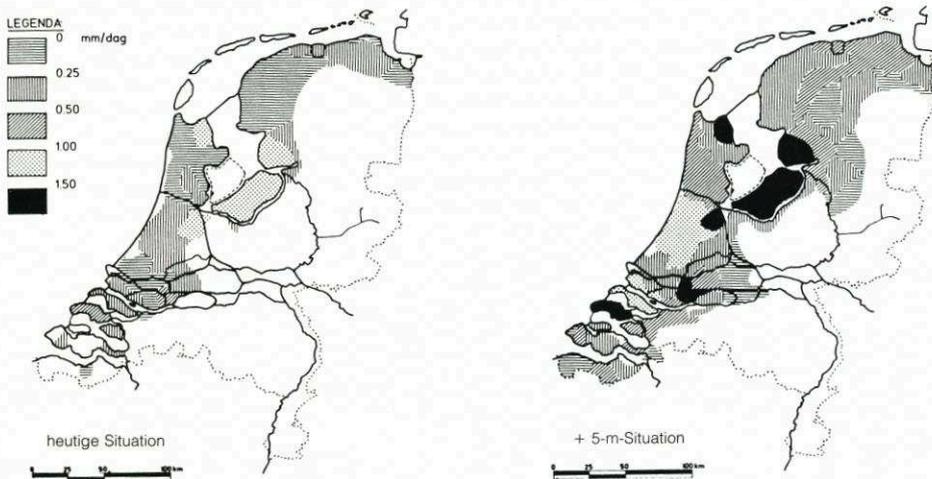


Abb. 4.1. Allgemeine Übersicht von der Kwelsituation in den Niederlanden

Aus Abb. 4.1 geht ferner hervor, daß sich bei einem Meeresspiegelanstieg von 5 m die östliche Grenze des niederländischen Kwelgebietes um ca. 25–30 km landeinwärts verlagert. In zahlreichen, bereits jetzt von salzigem Kwel heimgesuchten Gebieten wird die Intensität des Kwels bis auf mehr als 1,5 mm/Tag zunehmen. Für den größten Teil der Provinzen Nord- und Südholland und ca. die Hälfte von Zeeland, Groningen und Friesland wird der Kwel in jedem Fall Werte von 0,5 mm/Tag überschreiten.

Das größte Problem im Zusammenhang mit der Kwelzunahme wird nicht so sehr die zusätzlich einströmende Wassermenge sein. Im Hinblick auf die bereits jetzt festzustellende

* Maifeld = määhfähiges Grasland (vgl. Lüders u. Luck, Kleines Küstenlexikon). Hier allgemein für „Geländeoberfläche“ verwendet.

durchschnittliche totale Wasserbelastung kann gewöhnlich nur von einer eher bescheidenen Zunahme gesprochen werden. Wenn einstweilen aber davon ausgegangen wird, daß der Chloridgehalt des Kwl keinen größeren Veränderungen unterliegt, muß in großen Teilen von West- und Nordniederland mit einer Verdoppelung oder Verdreifachung der Salzlast gerechnet werden. Aus einer Analyse der jetzt in den Niederlanden geltenden Beziehung zwischen der Salzlast und dem erforderlichen Zuwässerungsbedarf kann abgeleitet werden, daß diese zwei- bis dreimal so große Salzbelastung global einen 1,5mal so großen Bedarf an Zuwässerung mit sich bringt. Diese etwa 50 % zusätzliche Menge süßen Oberflächenwassers zugunsten der Durchspülung ist nötig, um den Salzgehalt des Oberflächenwassers in verschiedenen Poldern in akzeptableren Grenzen zu halten. Vornehmlich aus der Sicht der Landwirtschaft und der Gesundheitsfürsorge werden Forderungen an den höchstzulässigen Salzgehalt gestellt. So sind z.B. im Agrarsektor Treibhausgewächse wie Blumen und Gemüse sehr anfällig für Salzschäden. Da der Treibhausebau für seine Wasserversorgung vom Oberflächenwasser abhängig ist, würde ein höherer Salzgehalt demzufolge einen großen Nachteil für diesen in ökonomischer Hinsicht wichtigen Zweig des Agrarsektors bedeuten.

Es stellt sich die Frage, ob derartige Mengen süßen Oberflächenwassers für die Durchspülung verfügbar sind, um die zusätzliche Salzlast in den Niederlanden unter allen Umständen bekämpfen zu können. Vornehmlich in trockenen Sommern wird das aufgrund des geringen Abflusses der Flüsse vermutlich ein großes Problem sein. Unter normalen Verhältnissen scheint jedoch einstweilen der zusätzliche Bedarf an Süßwasser gesichert werden zu können.

4.3 Süßwasservorrat

Die Auswirkungen eines Meeresspiegelanstiegs von 5 m auf den Süßwasservorrat unter den Dünen sollen anhand eines schematischen Beispiels erläutert werden, das die Situation unmittelbar nördlich von Scheveningen zeigt. Mit einem ca. zwei Kilometer breiten Dünenstreifen entspricht die Situation dort dem Mittel zwischen einer viel schmaleren Dünenkette wie z.B. bei Monster und einem weitaus umfangreicheren Dünengebiet, wie es bei Zandvoort vorzufinden ist. Da die Breite der Dünenkette einen bedeutenden Einfluß auf die Größe des Süßwasservorrates unter den Dünen hat, kann der Zustand bei Scheveningen als repräsentativ für niederländische Verhältnisse angesehen werden.

In Abb. 4.2 ist die Grundwassersituation unter den Dünen sowohl vor als auch nach einem Meeresspiegelanstieg dargestellt. Die in der heutigen Situation für die Berechnung symmetrisch angenommene Aufwölbung der Grundwasseroberfläche unter den Dünen ist abhängig vom Nettoniederschlagsüberschuß (Niederschlag minus aktueller Verdunstung), der Nettoinfiltrationsmenge (Infiltration minus Gewinnung), der Breite der Dünenkette, dem Durchlaßvermögen der obersten wasserführenden Schicht und dem Unterschied zwischen dem Meeresniveau und dem Polderpegel an der Landseite der Dünen. Durch Anwendung repräsentativer Werte bei vorgenannten Parametern wurde für die heutige Situation eine maximale Höhe der Grundwasseroberfläche von 2 m über NAP berechnet. Sie stimmt weitgehend mit Werten neueren Datums überein, die in diesem Dünengebiet ermittelt wurden. Ausgehend von einem Dichteunterschied von 25 kg/m^3 zwischen Salz- und Süßwasser wird die angenommene Grenzfläche zwischen beiden Wassertypen schätzungsweise vierzigmal so tief unter NAP liegen wie die Höhe der Grundwasseroberfläche oberhalb NAP. Die maximale Tiefe der süßen bzw. salzigen Grenzfläche wird sich daher ca. 80 m unterhalb NAP befinden. Die berechneten Grenzen des Süßwasservorrates unter den Dünen sind für die heutige Situation im linken Teil von Abb. 4.2 graphisch dargestellt.

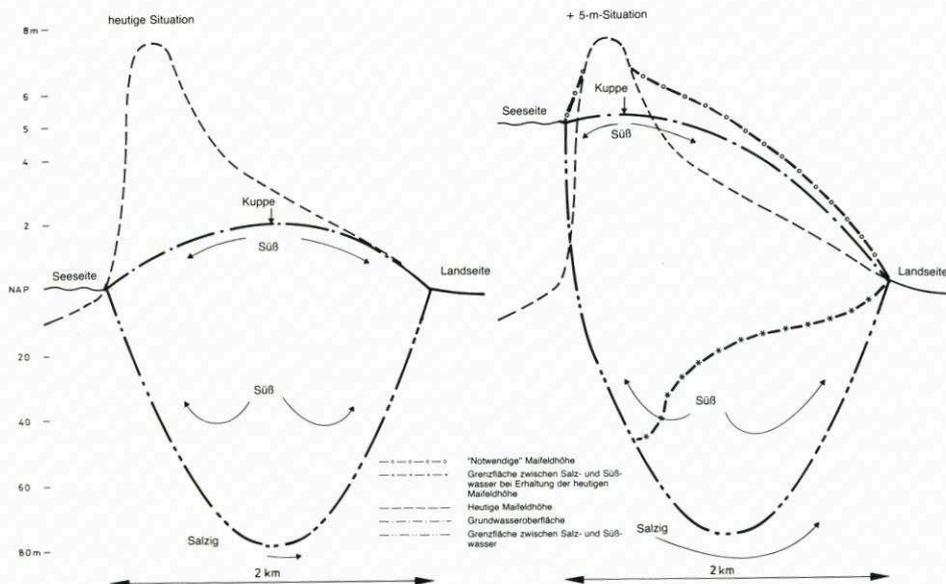


Abb. 4.2. Die Veränderung der Süßwasservorräte unter den Dünen

Bei einem Meeresspiegelanstieg von 5 m verändert sich die geohydrologische Situation drastisch. Die Grundwasseroberfläche wird dadurch ein Niveau erreichen, wie es im rechten Teil von Abb. 4.2 zu erkennen ist. Das setzt jedoch voraus, daß die Maifeldhöhe ausreichend hoch ist. Das kann vornehmlich auf dem landeinwärts gelegenen Teil des Dünenstreifens ein Problem sein. Falls die Maifeldhöhe dort nicht ausreichend ist, wird die Grundwasseroberfläche ihre potentielle Höhe nicht erreichen können. Im Zusammenhang damit wird auch die Tiefe der süßen bzw. salzigen Grenzfläche beträchtlich abnehmen. Es muß daher mit einer erheblichen Verkleinerung der Süßwasserglocke gerechnet werden. Bei der Lageberechnung der süßen bzw. salzigen Grenzfläche im Fall eines Meeresspiegelanstiegs wurde davon ausgegangen, daß die Salzwassersteighöhe linear von 5 m oberhalb NAP an der Küste zu NAP am Rande eines Polders hinter den Dünen abnimmt. Bei einer unzureichenden Maifeldhöhe im inneren Dünenstreifen wird die Grundwasseroberfläche dort an die Oberfläche treten, was zu Süßwasserkwel, Versumpfung, dem möglichen Entstehen von Dünenseen und einem Übergang zu feuchtigkeitsliebender Vegetation führen könnte.

Wenn die äußeren Dünen ausreichend hoch sind, um dem Meeresspiegelanstieg unbeschadet widerstehen zu können, und gleichfalls die in einigen Fällen notwendige Maifelderhöhung über einen Streifen von gut einem Kilometer landeinwärts durchgeführt wird, kann sich die Grundwasseroberfläche frei entwickeln. Die berechnete Lage der Grundwasseroberfläche in Abb. 4.2 basiert auf der Annahme, daß die evtl. notwendige Maifelderhöhung mit Füllmaterial durchgeführt wird, das hinsichtlich Durchlässigkeit usw. dieselben Eigenschaften wie der heutige Dünen sand aufweist. Dank der freien Entwicklung der Grundwasseroberfläche kann nun auch die Süßwasserlinse ihre potentielle Tiefe erreichen. In diesem Fall ergibt sich aus den Berechnungen, daß der Süßwasservorrat unter den Dünen intakt bleiben kann.

Ebenso ist aus Abb. 4.2 abzuleiten, daß der Schwerpunkt der Süßwasserlinse sich in Richtung Küste verschieben wird. Namentlich die Kuppe der Grundwasseroberfläche wird sich küstenwärts verlagern. Das Ausmaß dieser Verschiebung der Lage des Maximums der

Grundwasseroberfläche ist proportional zur Durchlässigkeit der obersten wasserführenden Schicht und zur Differenz zwischen dem Meeresniveau und dem Polderpegel an der Landseite der Dünen. Daneben besteht eine umgekehrte Proportionalität zur Breite der Dünenkette und dem Nettoniederschlags- und Infiltrationsüberschuß. Diese Erscheinung hat Konsequenzen für den Abfluß der Überschüsse, denn der Überschuß auf der rechten Seite der Kuppe wird hauptsächlich zur Landseite abgeführt werden. Durch diese Entwicklung wird das unmittelbar hinter den Dünen liegende Gebiet mit einer größeren Belastung durch aus der Linse strömendes Süßwasser konfrontiert werden. Gegen diesen lokal auftretenden Süßwasserkwel werden nötigenfalls Maßnahmen ergriffen werden müssen.

Die Verlagerung der Kuppe der Grundwasseroberfläche in Richtung Küste kann natürlich nicht unbeschränkt vonstatten gehen. Wenn die Kuppe mit der Küstenlinie zusammenfällt, ist möglicherweise ein kritischer Punkt erreicht. Das ist dann der Fall, wenn der Meeresspiegelanstieg global viermal größer wird als die heutige maximale Aufwölbung der Grundwasseroberfläche über NAP. Bei einem weiteren Meeresspiegelanstieg läuft die hydrologische Situation Gefahr, instabil zu werden, und die Süßwasserlinse wird bedroht. Ohne weitere kompensierende Maßnahmen (z. B. zusätzliche Infiltration süßen Oberflächenwassers) besteht die Gefahr, daß der Süßwasservorrat dann, auch unter Einfluß der in dieser Situation stark zunehmenden Strömung des süßen Kwel unter der Linse, drastisch abnehmen wird. Aus der Relation der Parameter, von denen diese Verschiebung des Maximums der Grundwasseroberfläche abhängig ist, kann abgeleitet werden, daß eine derartige kritische Situation zuerst bei schmalen Dünenstreifen auftreten wird, wo im Hinblick auf die Wassergewinnung wenig infiltriert und das Durchlaßvermögen relativ groß ist. Im dargestellten Beispiel, bezogen auf die Situation von Scheveningen, würde eine derartige kritische Situation erst bei einem sehr extremen Meeresspiegelanstieg von ca. 8 m in Erscheinung treten. Für Dünengebiete, wo als Folge spezifischer Umstände, die mit den o. a. Faktoren zusammenhängen, das Maximum der Grundwasseroberfläche in der heutigen Situation schon nicht viel höher liegt als etwa 1,25 m oberhalb NAP, würde ein Meeresspiegelanstieg von 5 m sich jedoch fatal auf den Süßwasservorrat auswirken. Schmale Dünenstreifen wie z. B. im Westen sind demzufolge im allgemeinen anfälliger.

Die globale Schlußfolgerung daraus lautet, daß der Süßwasservorrat unter den Dünen zwar durch einen Meeresspiegelanstieg von 5 m bedroht wird, aber durch Gegenmaßnahmen in den meisten Fällen geschützt werden kann. Neben rechtzeitiger Erhöhung und Verstärkung der Seedeiche sind in etlichen Fällen eine möglichst bedeutende Maifelderhöhung in der Breite von 1-2 km und/oder zusätzliche Infiltration süßen Oberflächenwassers erforderlich.

5. Veränderungen der Wellen und des Seegangsklimas

5.1 Einleitung

Bei den Berechnungen wurde von der Voraussetzung ausgegangen, daß das meteorologische Klima etwa gleich bleibt.

Folgende Testrechnungen wurden ausgeführt:

1. Wellenentwicklung unter Annahme eines schematisierten Nordseebodens
2. Wellenentwicklung auf der gesamten Nordsee während eines Orkans
3. Dünung
4. Veränderungen in der Wellenentwicklung an der Küste bei den Haringvlietschleusen
Vorab eine Einschätzung der Auswirkungen, die auftreten werden: Für eine Wassertiefe

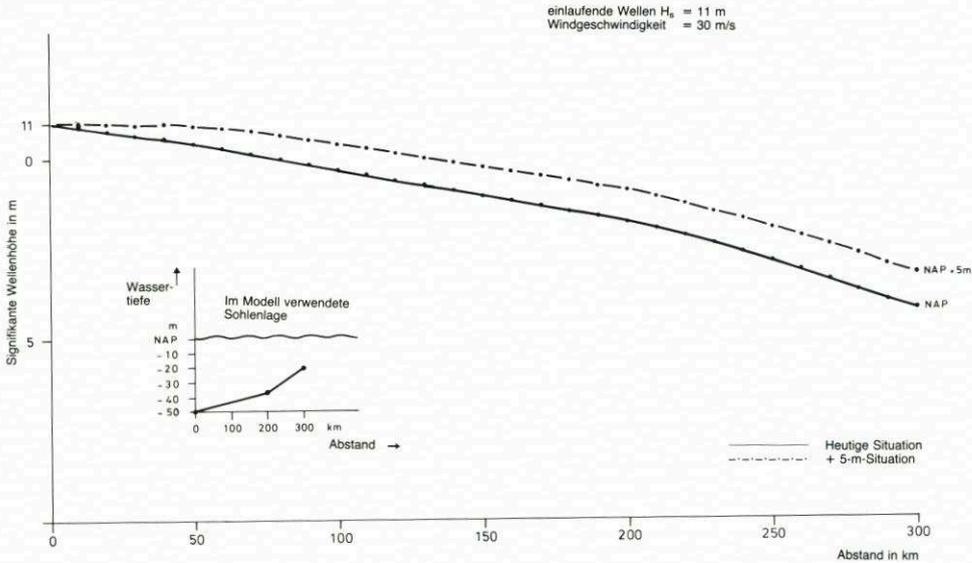


Abb. 5.1. Abnahme der Wellenhöhe in Richtung Küste

von mehr als 20 m gilt folgendes: Die größere Wassertiefe wird zur Folge haben, daß die Wellen weniger Bodenreibung haben, es sind also höhere Wellen zu erwarten. Auch die Dünung wird weiter vordringen. In der Nähe der Küste, bei einer Tiefe von weniger als 20 m, ist die Topographie sehr wichtig. Sandbänke vor der Küste, wie z.B. das Voordelta, werden dämpfend wirken. An Orten, an denen dies nicht der Fall ist, wird – in jedem Fall zu Beginn – die Wellenbewegung zunehmen. Der abgetragene Sand wird auf dem Vorstrand sedimentieren, wodurch die Wellenwirkung an der Wasserlinie wieder abnimmt. Letztendlich wird sich ein Gleichgewichtsprofil einstellen, zumindest wenn ausreichend Sand zur Verfügung steht. Außerhalb der Brecherzone wird das Wellenklima sicher rauher sein. Für Vorhersagen von Sedimentation und Erosion an der Küste ist es wichtig, neben dem durch Wellenwirkung induzierten Quertransport eine genaue Berechnung der Strömungen aufzustellen.

5.2 Besprechung einiger Computerberechnungen

1) Bei einer Sohle mit parallelen Tiefenlinien von 50 m unter NAP über einen Abstand von 200 km linear ansteigend bis 35 m unter NAP und weiter über 100 km bis 20 m unter NAP sind mit Hilfe einer Modellrechnung Wellenhöhe und Wellenperiode ermittelt worden. Dabei reduzierte sich die Wellenhöhe auf der Strecke von 300 km von 11 m auf 5,80 m (s. Abb. 5.1). Bei einer zusätzlichen Wassertiefe von 5 m nimmt die Wellenhöhe von 11 m nur auf 6,70 m ab. Das stimmt ziemlich überein mit Erfahrungen, die auf der Leuchtplattform Goeree gemacht worden sind. Von der Wellenhöhe bei der Ölplattform Aukfield bleiben bei Goeree nur ungefähr 50 % erhalten. Dieser Anteil würde in Zukunft 60 % betragen, die Wellenhöhen bei der Leuchtplattform Goeree nehmen also um 15–20 % zu.

2) Das sich noch in der Entwicklung befindende Modell wurde für die gesamte Nordsee angewandt, Ausgangspunkt war eine einlaufende Welle bei den Faröerinseln mit 15 m Wellenhöhe und einer Periode von 15 Sek. Es wurde ein konstanter Nordwind von 30 m/s

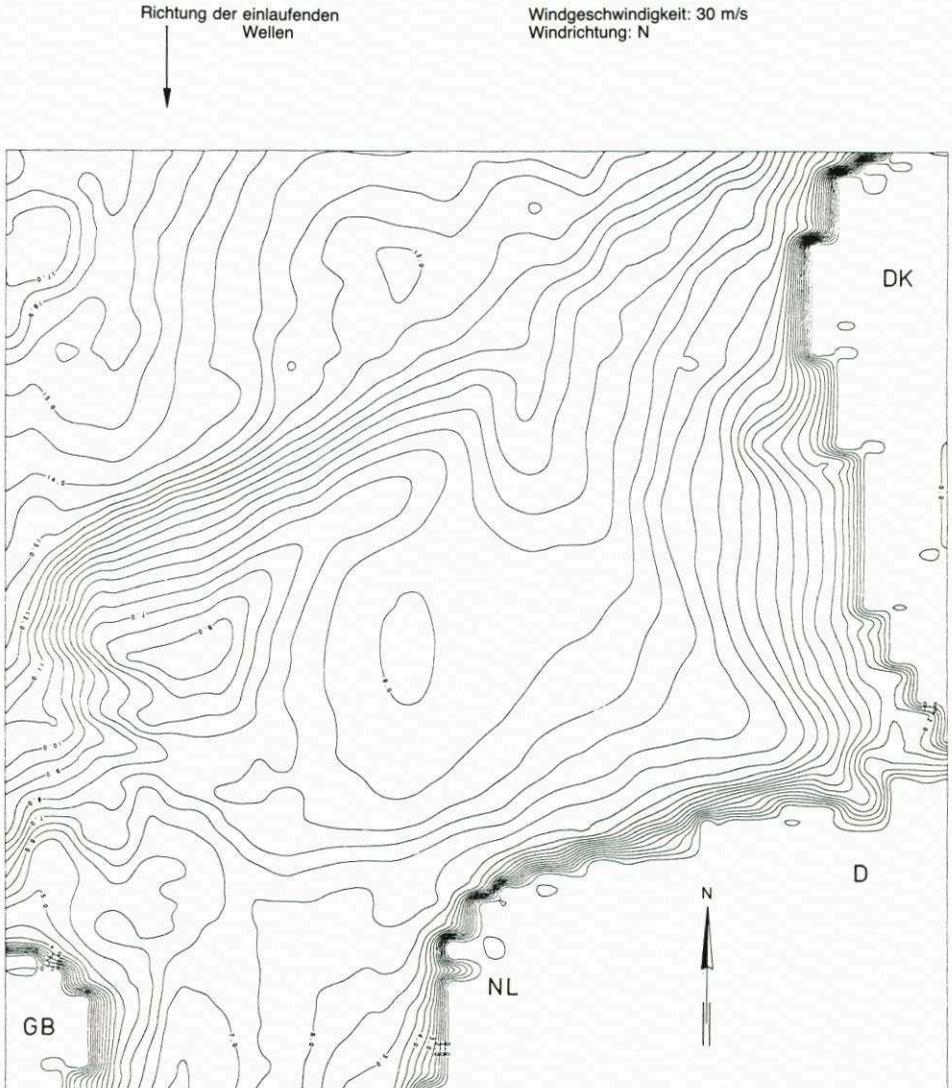


Abb. 5.2. Signifikante Wellenhöhe, heutige Situation

angenommen. Abb. 5.2 und 5.3 zeigen für einen Teil des berechneten Gebietes Isolinien der Wellenhöhe. Deutlich ist eine Abnahme der Wellenhöhe in der Nähe der Doggerbank zu erkennen. Die Übereinstimmung mit den Resultaten der schematisierten Topographie des Meeresbodens ist sehr deutlich.

3) Welche Konsequenzen hat ein Meeresspiegelanstieg von 5 m für das Anlaufen des Rotterdamer Hafens? Im Augenblick ist es nicht so, daß alle Schiffe zu jeder Zeit den Hafen erreichen können. Es wird über eine Zulassungsbeschränkung für große Schiffe gesprochen. Die Zulassungsbeschränkung basiert auf der Möglichkeit, daß ein Schiff in der Einfahrt aufläuft. Die Gefahr aufzulaufen wird durch die Wassertiefe und die vertikale Schiffsbewegung bestimmt. Es ist deutlich, daß durch eine größere Wassertiefe von 5 m die Gefahr

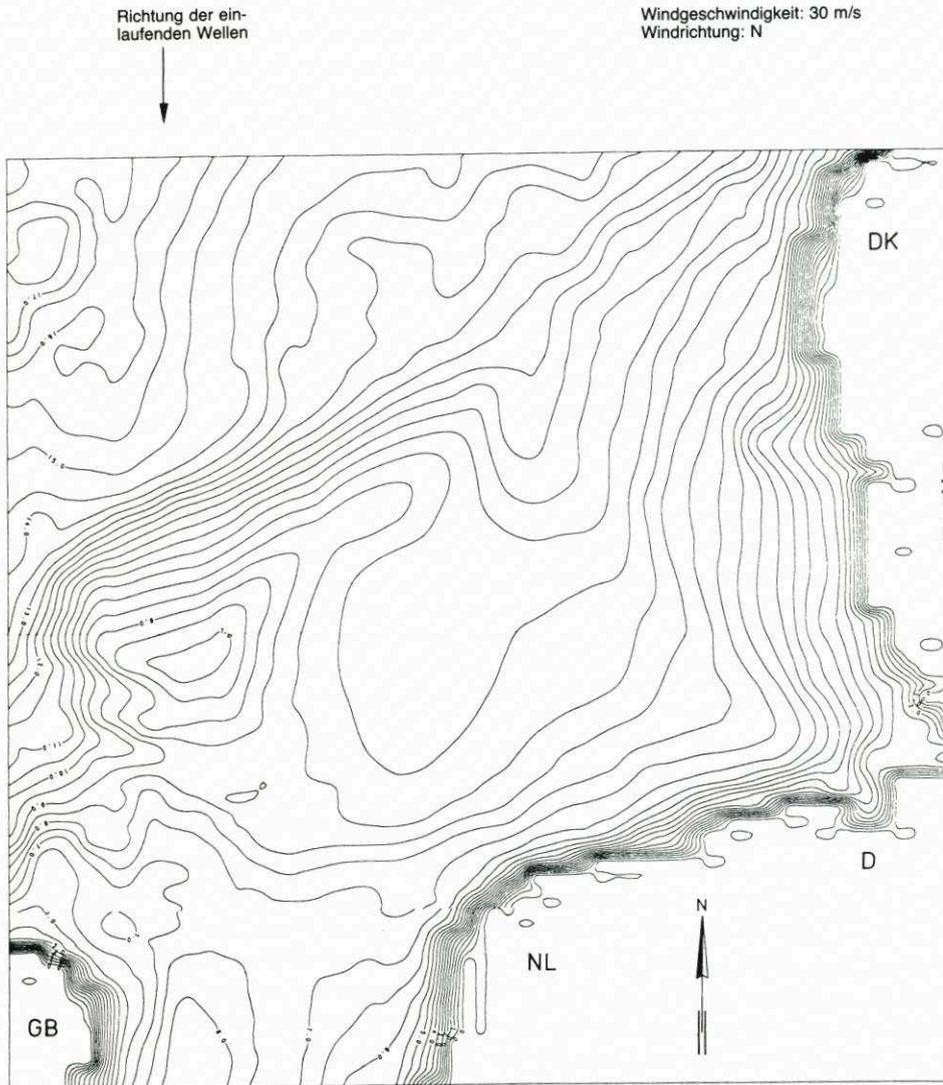


Abb. 5.3. Signifikante Wellenhöhe bei einem um 5 m höheren Meeresspiegel

festzulaufen verringert wird. Andererseits ist eine Vergrößerung der Wassertiefe mit einer ansehnlichen Vergrößerung der im Bereich der Eurogeul-Fahrrinne* erwarteten niederfrequenten Energie verbunden. Die Berechnung mit einem Modell zeigt, daß selbst in extremen Situationen die niederfrequente Energie um 80 % zunehmen kann. Die vertikalen Schiffsbewegungen werden vollständig bestimmt durch die niederfrequente Energie, und zwar derartig, daß eine Erhöhung der niederfrequenten Energie eine Vergrößerung der vertikalen Schiffsbewegung induziert.

* Die Fahrrinne von See zum Europort, seawärts von Rotterdam, = seawärtiger Teil des Nieuwe Waterweg.

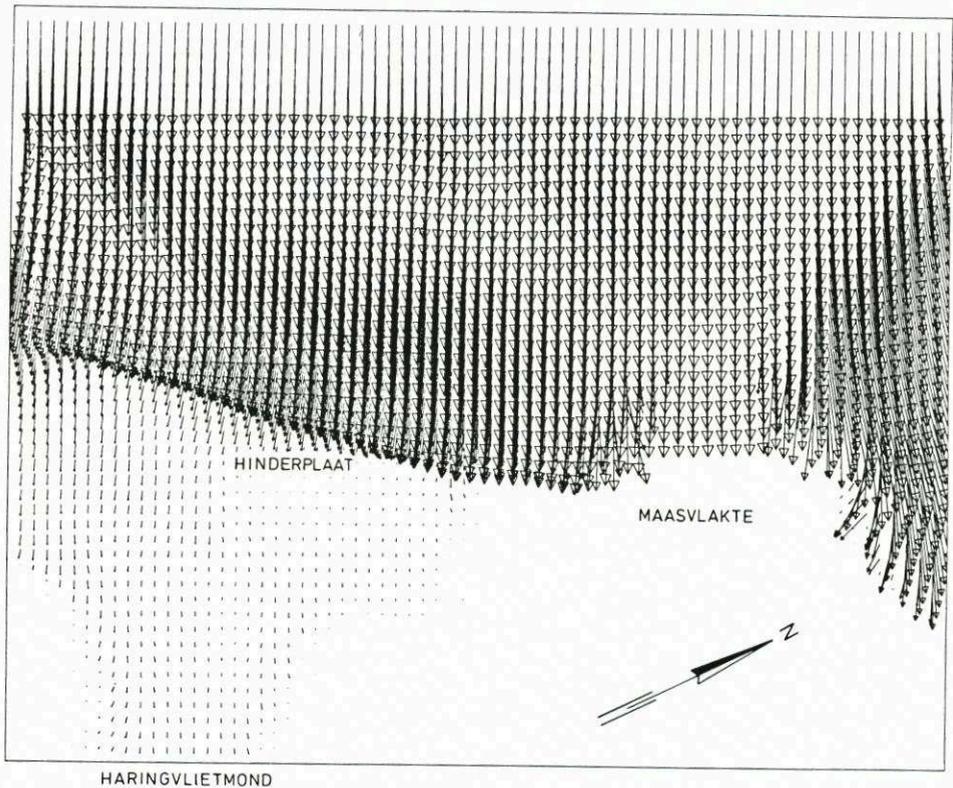


Abb. 5.4. Wellenenergie, heutige Situation. Wellenhöhe der einlaufenden Wellen 2,5 m

Zusammengefasst bewirkt eine Wasserstandserhöhung indirekt größere vertikale Schiffsbewegungen, was dazu führt, daß die Gefahr festzulaufen, vergrößert wird. Andererseits reduziert die Wasserstandserhöhung die Gefahr des Festlaufens jedoch so stark, daß daraus geschlossen werden kann, daß das Anlaufen des Hafens von Rotterdam als Folge einer Wasserstandserhöhung von 5 m erleichtert wird.

4) Eine Anzahl Modellrechnungen sind für ein Gebiet seawärts der Haringvlietschleusen mit Nordwestwind von 15 m/s ausgeführt worden. Für die erste Berechnung (Abb. 5.4) wurden für die einlaufenden Wellen Wellenhöhen von 2,5 m angenommen, für die zweite (Abb. 5.5) Wellenhöhen von 3 m. Die dritte Berechnung (Abb. 5.6) erfolgte für einen um 5 m erhöhten Wasserstand und Wellenhöhen von 3 m. Die beiden letzten Berechnungen wurden durchgeführt, um die Bedeutung der Topographie zu erkennen. Steigt die Sohle mit an und verändert sich so nur die Wellenhöhe in tieferem Wasser (hier von 2,5 auf 3 m), wird die Wellenhöhe bei den Schleusen noch keinen Zentimeter höher: die Sandbank Hinderplaat schirmt alles ab. Bleibt dagegen die Sohle auf derselben Höhe, so daß allein eine Wasserstandserhöhung auftritt, verändert sich, selbst bei geringen Windveränderungen, die Wellenhöhe von 90 cm auf 2,10 m.

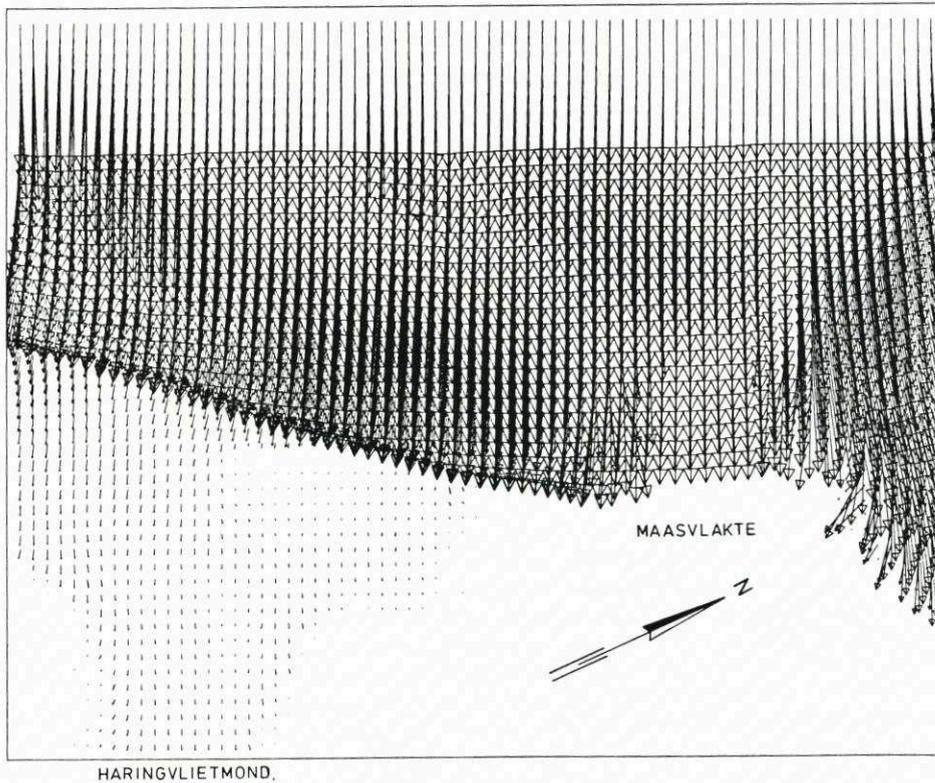


Abb. 5.5. Wellenenergie, heutige Situation (oder Meeresspiegelanstieg um 5 m und um 5 m erhöhter Meeresboden). Wellenhöhe der einlaufenden Wellen 3,0 m

6. Morphologische Folgen

6.1 Einleitung

In diesem Kapitel wird versucht, die morphologischen Folgen eines Meeresspiegelanstiegs von 5 m in 200 Jahren darzustellen, wobei davon ausgegangen wird, daß die Niederlande insgesamt (evtl. unter Ausschluß der westfriesischen Watteninseln) trocken gehalten werden. Dies ist als eine wahrscheinliche Lösung anzusehen. Außerdem wird davon ausgegangen, daß nach 200 Jahren der Meeresspiegel nicht weiter steigt.

Um die morphologischen Folgen des Meeresspiegelanstiegs darzustellen, werden die Niederlande in drei charakteristische Küstengebiete eingeteilt, nämlich:

- die sog. „Geschlossene Küste“, das ist der Küstenstreifen zwischen Den Helder und Hoek van Holland,
- das Wattengebiet,
- das Deltagebiet.

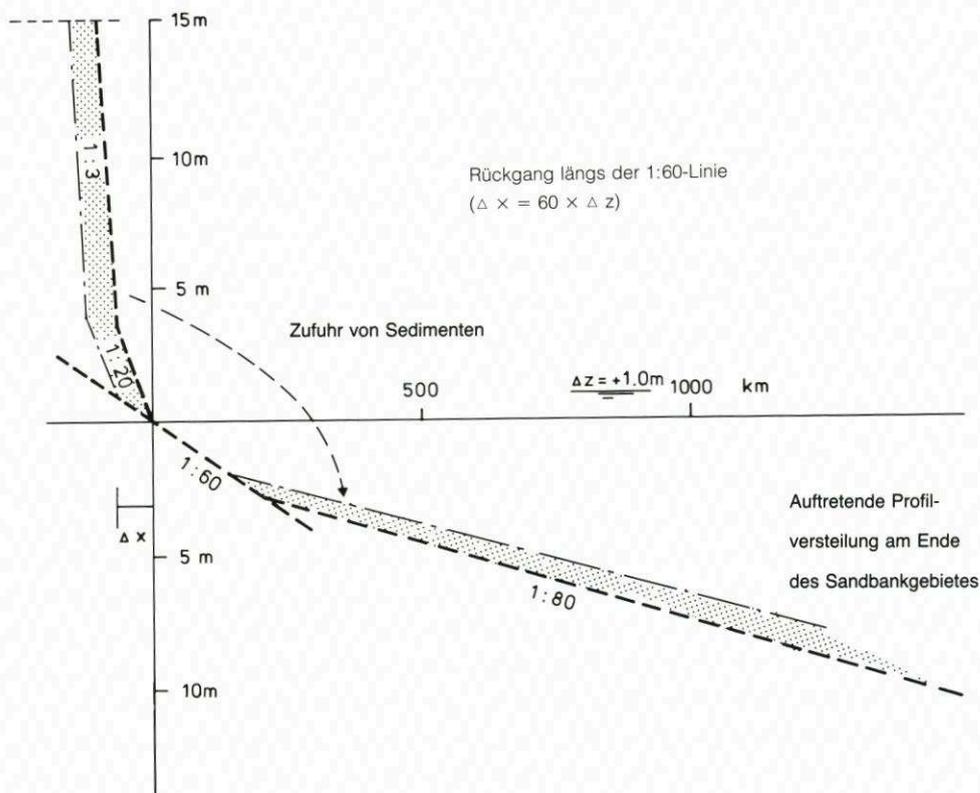


Abb. 6.1. Einfluß des Meeresspiegelanstiegs auf das Küstenprofil

tersuchungen entlang der „Geschlossenen Küste“ haben gezeigt, daß der Dünen sand im Durchschnitt 30 % feiner ist als der Sand am Strand. Aus der Analyse der jährlichen Küstenvermessung im Zusammenhang mit der Sandkornkonsistenz hat sich ergeben, daß bei einer Abnahme der Sandkorngröße von 30 % die Küstenneigung von ca. 1:60 bis ca. 1:80/100 abnimmt. Weil ständig ein Teil des Abbruchprofils mit Dünen sand aufgefüllt werden soll, kann allgemein gesagt werden, daß die Annahme nicht ganz korrekt ist und daß als Folge hiervon der Küstenabtrag maximal bis zu 500 m zunehmen kann. Es muß noch angemerkt werden, daß die oben angeführte Schlußfolgerung auch stark abhängig sein wird von dem für den Dünen schutz benötigten Sand.

d) Es gibt keinen räumlichen Gradienten bei von Wellen und Gezeiten bewirkten Längsströmungen. Nach den heutigen Erkenntnissen, basierend auf der Analyse der jährlichen Küstenvermessung, kann gesagt werden, daß diese Annahme nicht richtig ist; die Küstenlinie von Scheveningen bis Bloemendaal (südlich von IJmuiden) hat sich in den letzten 100 Jahren um 40 m vorverlagert, während von Egmond bis Den Helder (nördlich von IJmuiden) die Küstenlinie um mehr als 150 m zurückgegangen ist. Zum großen Teil werden diese Veränderungen dem Gradienten der Längsströmung zugeschrieben. Aufgrund der Tatsache, daß der Sand auf dem Vorstrand feiner wird, kann die Größenordnung des Längstransportes auch zunehmen.

Im großen und ganzen bedeutet dies, daß der Küstenabtrag entlang der „geschlossenen Küste“ auf der Basis dieses Prozesses zwischen 200 m und 550 m variieren kann.

Abschließend kann gesagt werden, daß der Küstenabtrag unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Annahmen zwischen 250 und 750 m bei einem Meeresspiegelanstieg von 5 m variiert. Zu dieser Aussage gehört das Bild eines allmählichen Abtrages und einer schwächer werdenden Strandneigung.

6.3 Ästuarische Systeme

6.3.1 Allgemeines

Die morphologische Entwicklung von ästuarischen Systemen als Folge eines Meeresspiegelanstiegs wird im wesentlichen bestimmt durch die Zu- oder Abnahme des Flutwasservolumens in Relation zur Zunahme der Querschnittsfläche der Hauptwasserläufe im Tidegebiet (z.B. Marsdiep).^{*} Das Flutwasservolumen steht linear in Relation zum mittleren Durchfluß der Hauptwasserläufe bei Flutstrom. Der Durchfluß zeigt auf seine Weise eine eindeutige Relation mit der mittleren Querschnittsfläche der Hauptwasserläufe. Mit anderen Worten: Wenn beispielsweise das Flutwasservolumen abnimmt, wird direkt der Durchfluß abnehmen, und nach geraumer Zeit wird ebenfalls das Querprofil des Hauptwasserlaufs abnehmen. Wieviel Zeit die Anpassung der Querschnitte der Hauptwasserläufe benötigt, ist abhängig von der Sedimentzufuhr. Im Falle des angenommenen Meeresspiegelanstiegs sind folgende Situationen zu unterscheiden:

– Situation a)

Das Flutwasservolumen bleibt gleich. Diese Situation tritt ein, wenn in dem betreffenden System wenig oder keine während der Ebbe trockenfallenden Flächen (Zwischengezeitengebiete) liegen (inkl. Außengroden oder Vorland). Weil aber doch der Querschnitt des Hauptwasserlaufs zunimmt, werden der Durchfluß bei Flutstrom und damit die Strömungsgeschwindigkeit und die Transportkapazität abnehmen, so daß Sedimentation auftreten wird. Diese Sedimentation geht weiter, bis ein neues Gleichgewicht zwischen dem abgenommenen Durchfluß und dem Durchflußquerschnitt entstanden ist.

– Situation b)

Das Flutwasservolumen nimmt zu, aber die Zunahme ist prozentual gesehen kleiner als die Zunahme des mittleren Durchflußquerschnitts. Diese Situation ist qualitativ vergleichbar mit der Situation, die unter a) beschrieben ist. Quantitativ gesehen wird die Anpassung des Durchflußquerschnitts in Situation b) weniger groß sein.

– Situation c)

Das Flutwasservolumen nimmt zu; diese Zunahme ist größer als die Zunahme des mittleren Durchflußquerschnitts. Diese Situation kommt vor, wenn ausgedehnte Zwischengezeitengebiete in dem betreffenden Gebiet vorkommen. Ausgehend von der benötigten Zeit der morphologischen Anpassung wird beispielsweise bei jedem Meeresspiegelanstieg von 0,5 m die entsprechende Zone des Zwischengezeitengebietes nicht mehr trockenfallen, und das Flutwasservolumen nimmt zu, weil das Volumen, das für den Anstieg von 0,5 m durch Zwischengezeitengebiete eingenommen würde, jetzt durch ein gleich großes Wasservolumen eingenommen werden muß.

Durch die relativ größere Zunahme des Flutwasservolumens nehmen Durchfluß und damit Strömungsgeschwindigkeit und -kapazität zu. Mit anderen Worten: es tritt eine Erosion

^{*} Das Marsdiep ist das Seegat zwischen Texel und Den Helder.

in den Hauptwasserläufen auf, bis wieder zwischen den zugenommenen Durchflüssen und den Durchflußquerschnitten ein Gleichgewicht besteht. Die erodierten Sedimente werden sich teils auf dem Watt und teils auf Außensänden absetzen.

Bei der Beantwortung der Frage, wie die morphologische Entwicklung in den kommenden 200 Jahren sein wird, gelten als wichtige Probleme das Abschätzen der Veränderung des Flutwasservolumens in dieser Zeit und das Abschätzen des Ausmaßes, in dem die morphologische Anpassung an die Veränderungen des Flutwasservolumens erfolgt.

In bezug auf das erste Problem kann angemerkt werden:

- daß mit keiner oder nur mit einer geringen morphologischen Anpassung gerechnet werden kann, daß nach 100 Jahren (= 2 m Steigung) nahezu alle Zwischengezeitengebiete permanent unter Wasser stehen, so daß für die darauffolgenden 100 Jahre Situation a) zutrifft,
- daß die maximal vorhergesagte Zu- bzw. Abnahme des Tidehubs über 200 Jahre (10-20 %) relativ unwichtig zu sein scheint für die morphologische Entwicklung.

Im Hinblick auf das zweite Problem kann gesagt werden, daß, wie schon anfangs angemerkt worden ist, die Sedimentzufuhr maßgebend sein wird.

6.3.2 Das Wattenmeer

(es wird nur der niederländische Teil berücksichtigt)

Ausgehend von der Annahme, daß das Wattenmeer nach einem Meeresspiegelanstieg nach 200 Jahren genauso vorhanden ist wie im Augenblick (identische Tiefenverteilung), kann eine Schätzung der insgesamt benötigten Menge an Sedimenten gegeben werden (s. Tab. 1), um eine vollständige morphologische Anpassung zu realisieren.

Auf der Basis von Meßergebnissen ist von 7 der 10 genannten Wateinzugsgebiete bekannt, wieviel Sediment unter den heutigen Umständen abgesetzt wird (s. Tab. 2; für Gebiete ohne Angaben wurde eine Schätzung gegeben; Abb. 6.2).

Bei dem heutigen Meeresspiegelanstieg von ca. 0,2 m/Jahrh. wird demnach zwischen 15 und $45 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{Jahr}$ Sediment im niederländischen Teil des Wattenmeeres abgesetzt. Eine erste Schätzung in bezug auf den Zeitraum, in dem das Wattenmeer morphologisch angepaßt ist, kann jetzt durch die Annahme gegeben werden, daß die Geschwindigkeit der Sedimentation in gleicher Größenordnung bleibt, wie unter heutigen Umständen. Für das gesamte Watten-

Tab. 1. Benötigte Menge an Sedimenten pro Wateinzugsgebiet in 10^6 m^3

	10^6 m^3
1. Seegat von Texel	3.550
2. Eyerlands Gat	780
3. Seegat von 't Vlie	3.350
4. Seegat von Ameland	1.550
5. Pinkegat	320
6. Friese Seegat	650
7. Eilanderbalg	280
8. Lauwers	700
9. Schild	200
10. Eems	2.600
Gesamt: 14.000	

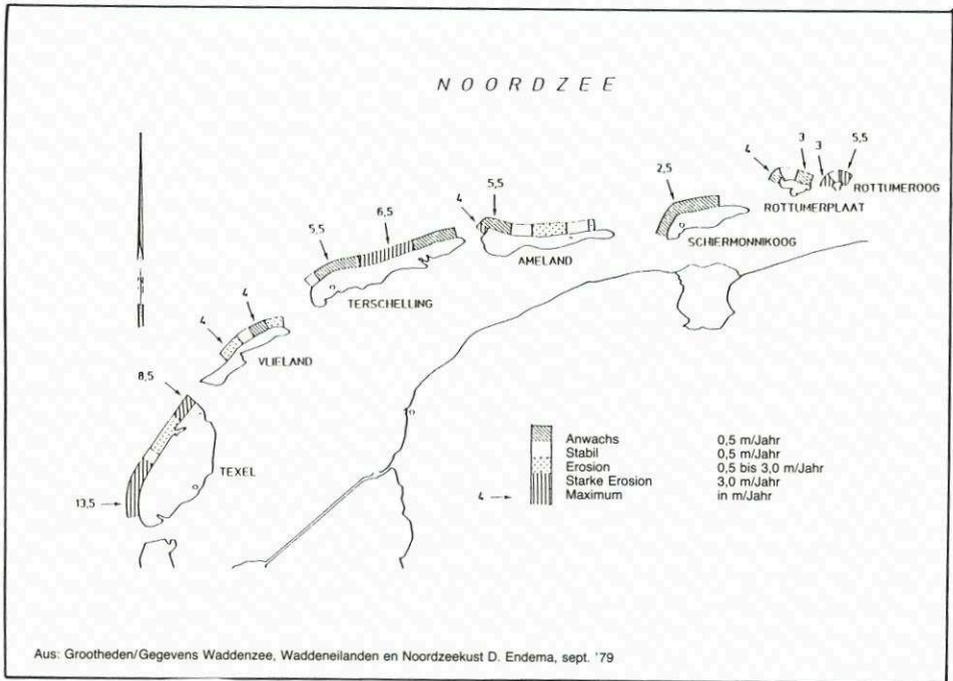


Abb. 6.2. Durchschnittlicher Vor- und Rückgang der Küste 1966 bis 1975

Tab. 2. Gegenwärtige Netto-Sedimentation pro Wateinzugsgebiet und Jahr

	$10^6 \text{ m}^3/\text{a}$	$10^6 \text{ m}^3/\text{a}$
Seegat von Texel	+8	s = 4
Eyerlands Gat	0	s = 1
Seegat von't Vlie	+8	s = 3
Seegat von Ameland	+1	s = 1
Pinkegat	+0,2	s = 0,1
Friese Seegat	+2,2	s = 0,4
Eilanderbalg	+1,4	s = 0,1
Lauwers*	+2,5	s = 1,5
Schild*	+2,6	s = 0,2
Eems*	+6	s = 4
	29,5	s = 15,3

* Schätzung
s = Standardabweichung

meer bedeutet das eine Anpassungsdauer, die zwischen 300 und 900 Jahren variiert, mit einem Durchschnitt von 600 Jahren.

Für eine genauere Bewertung dieser ersten Einschätzung ist es erforderlich, die Erwartung über den Verlauf des Flutwasservolumens und der Sedimentzufuhr in den kommenden 200 Jahren zu analysieren. Auf der Basis eines linearen Meeresspiegelanstiegs und der Größe der vorhandenen Zwischenzeitengebiete kann pro Gebiet eine Abschätzung der relativen

Tab. 3. Zunahme des Flutwasservolumens und des Durchflußquerschnitts

	Flutwasservolumen			Durchflußquerschnitt		Situation	
	10^6 m^3	Zunahme in % nach:		Zunahme in % nach:		100 J	200 J
		100 J	200 J	100 J	200 J		
Seegat von Texel	1050	0	0	10	20	a	a
Eyerlands Gat	160	50	55	60	120	b	b
Seegat von't Vlie	880	25	30	25	50	*	b
Seegat von Ameland	430	35	40	30	55	c	b
Pinkegat	100	35	40	170	340	b	b
Friese Seegat	200	35	40	60	120	b	b
Eilanderbalg	70	60	70	175	350	b	b
Lauwers	210	45	50	50	100	b	b
Schild	40	110	125	275	510	b	b
Eems	1000	15	20	20	35	b	b

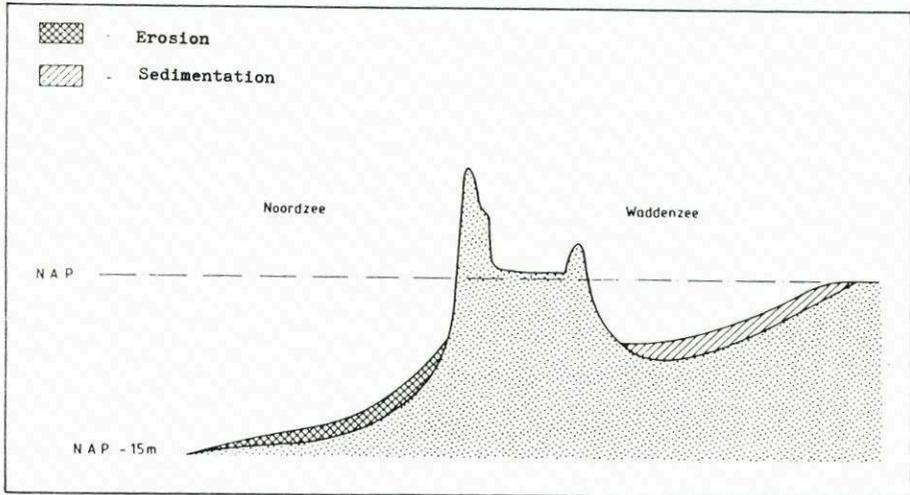
* Gleichgewicht zwischen der Zunahme des Flutwasservolumens und des Querschnitts

Zu- oder Abnahme des Flutwasservolumens hinsichtlich der Zunahme der Durchflußquerschnitte gegeben werden (Tab. 3).

Nahezu im gesamten Wattenmeergebiet nehmen, falls die Sedimentation vernachlässigt wird, sowohl das Flutwasservolumen als auch die Durchflußquerschnitte zu, wobei fast immer die Querschnitte schneller zunehmen als die Flutwasservolumen (Situation b). Mit anderen Worten tritt im gesamten Wattenmeergebiet Sedimentation auf, mit Ausnahme des Seegats von Ameland, wo während der ersten 100 Jahre Erosion vorkommen könnte. Es muß auch angemerkt werden, daß die Zunahme der Querschnitte relativ niedrig geschätzt ist, weil von der geringsten Breite ausgegangen worden ist. Wenn angenommen wird, daß Teile der heutigen höchsten Inselerhebungen (z. B. de Vliehors, de Boschplaat) im Laufe von 200 Jahren ganz oder teilweise unter Wasser stehen werden, dann wird deutlich sein, daß die Zunahme der Querschnitte viel größer sein wird.

In der heutigen Situation sedimentieren durchschnittlich $30 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{Jahr}$. Von nur 25 % dieser Menge ist die Quelle bekannt. Die wichtigsten bekannten Quellen sind die Küste von Nord-Holland, Texel und Vlieland und dazu ca. $2 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{Jahr}$ Schlick aus der Nordsee (Abb. 6.3). Als mögliche Quellen können die Vorstrände von Nord-Holland und den Inseln, die Gebiete unmittelbar seewärts der Seegaten zwischen den Inseln und die Nordsee angesehen werden. Weil es momentan nicht möglich ist zu erklären, woher unter den heutigen Umständen das Sediment herkommt, wird als Annäherung folgende Hypothese aufgestellt:

Wenn die Herkunft von ca. 25 % der als Folge eines Meeresspiegelanstiegs benötigten Sedimente erklärt werden kann, dann wird angenommen, daß die übrigen 75 % aus unbekanntem Quellen geliefert werden. Die insgesamt benötigte Sedimentmenge beträgt $14 \cdot 10^9 \text{ m}^3$. Ausgehend von der derzeitigen Sedimentzufuhr von $30 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{J}$. kommt eine erste Berechnung zu einer Anpassungsdauer von 600 Jahren. In 200 Jahren bedeutet das eine erforderliche Menge von $4,6 \cdot 10^9 \text{ m}^3$, wovon tatsächlich $1,2 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ (= ca. 25 %) aus den in Tab. 4 genannten Quellen geliefert werden kann. Zu der Tabelle muß erwähnt werden, daß sich die Watteninseln in große, parallel zur Küste liegende Sandbänke verwandelt haben, die sich landwärts verschieben (vergleichbar mit der heutigen Entwicklung des Vordeltas). Es kann nunmehr pro Gebiet angegeben werden, wieviele Jahre es dauert, bis das betreffende Gebiet mit der hydraulischen Situation wieder im morphologischen Gleichgewicht ist (Tab. 5).



Aus: Zandaanwinning in de Waddenzee "Werkgroep I, Leeuwarden 1981"

Abb. 6.3. Sedimentation und Erosion an der westfriesischen Wattenmeerküste (schematisch)

Tab. 4. Sedimentquellen und deren Beitrag in 200 Jahren für das Wattenmeer

Watteninseln	+600·10 ⁶ m ³
„Ebb-tidal“ delta's	+150·10 ⁶ m ³
Nord-Holland	+200·10 ⁶ m ³
Schlick	+400·10 ⁶ m ³
Aufschiebung der Watteninseln (200m)	+100·10 ⁶ m ³
Anpassung der Küstenneigung	-250·10 ⁶ m ³
zusammen	+ 1,2·10 ⁹ m ³

Tab. 5. Dauer der morphologischen Anpassung der Watten

Seegat von Texel	450 Jahre
Eyerlands Gat	1000 Jahre
Seegat von't Vlie	400 Jahre
Seegat von Ameland	1000 Jahre
Pinkegat	1000 Jahre
Friese Seegat	300 Jahre
Eilanderbalg	200 Jahre
Lauwers	300 Jahre
Schild	1000 Jahre
Eems	450 Jahre

Anmerkungen

– Solange die Herkunft von 75 % des sich im Wattenmeer absetzenden Sediments nicht erklärt werden kann, ist jede weitere Aussage über die Zukunft nur eine grobe Berechnung. Die wesentlichste Frage im Hinblick auf die aufgestellte Hypothese ist, ob die unbekanntenen Quellen im Laufe der Zeit erschöpft sein werden.

- Angesichts der Geschwindigkeit, unter der sich 75 % des Wattenmeergebietes anzupassen scheint, ist es wahrscheinlich, daß lokal relativ tiefgelegene Zwischengezeitengebiete bestehen bleiben. Diese liegen vorzugsweise in der Nähe von Deichen, Watthöhenscheiden und landwärts der zur Küste gelegenen parallelen Sandbänke.
- Nach 200 Jahren wird ein bedeutender Teil der noch übriggebliebenen morphologischen Anpassungen, in Anbetracht der gesamten Verfügbarkeit an Sedimenten durch eine landwärtige Verlagerung der ehemaligen Watteninseln, realisiert werden. Diese Verlagerung kann örtlich auf 2 bis 5 km ansteigen.
- Die erforderliche Netto-Sedimentation beträgt pro Jahr nur ca. 5 % des Brutto-Sedimenttransportes (z.B. beim Marsdiep ca. 7 % und bei der Emsmündung ca. 1 %). Das bedeutet, daß eine kleine Verschiebung des Brutto-Sedimenttransportes große Konsequenzen für die Netto-Sedimentation haben kann. Angenommen, daß bei einem Meeresspiegelanstieg dieser Prozentsatz 10 % beträgt, dann bedeutet das, daß in ca. 50 % des Wattenmeergebietes die morphologische Anpassung Schritt hält mit dem Meeresspiegelanstieg. Auf der Basis der relativen Zunahme der Durchflußquerschnitte in bezug auf das Flutwasservolumen ist eine Vergrößerung dieses Prozentsatzes wahrscheinlich. Auch hier gilt, daß jedoch eine ausreichende Sedimentzufuhr vorhanden sein und bleiben muß. Aus diesen Gründen wird vorläufig angenommen, daß sich das heutige Verhältnis zwischen der Netto-Sedimentation und dem Brutto-Sedimenttransport nicht ändert.

Resümierend kann festgestellt werden, daß große Teile (75 %) des Wattenmeeres innerhalb von 500 Jahren morphologisch an einen Meeresspiegelanstieg von 5 m angepaßt sind. Zu dieser Aussage gehört das Bild, daß die Watteninseln in große, zur Küste parallel liegende Sandbänke verwandelt worden sind, die sich lokal um einige Kilometer landwärts verlagert haben. Zwischengezeitengebiete werden sehr lokal - nahe den Deichen, in der Nähe von Watthöhenscheiden, landwärts der großen Sandbänke - bestehen bleiben.

6.3.3 Das Deltagebiet

Wenn im Deltagebiet wie im Wattengebiet von der Annahme ausgegangen wird, daß die Ooster- und Westerschelde nach einem Meeresspiegelanstieg von 5 m ebenso vorhanden sein werden wie heute (identische Tiefenverteilung), dann sind folgende Sedimentmengen dafür erforderlich:

- Oosterschelde: $1750 \cdot 10^6 \text{ m}^3$
- Westerschelde: $1500 \cdot 10^6 \text{ m}^3$

Die Oosterschelde ist momentan noch ein Erosionsbecken, von dem erwartet wird, daß es nunmehr nach Fertigstellung des Sturmflutsperrwerks ein Sedimentationsbecken wird (Abnahme des Flutwasservolumens).

Sowohl die Zunahme des Flutwasservolumens als auch die Zunahme der Durchflußquerschnitte in 200 Jahren werden in der Oosterschelde und in der Westerschelde auf 25 % geschätzt. Im Gegensatz zum Wattenmeer bedeutet das, daß in jedem Fall in den ersten 100 Jahren beide Ästuare der Situation c) zuzurechnen sind. Die Zunahme des Flutwasservolumens wird vor allem in den ersten 100 Jahren stattfinden, wenn ein größerer Teil des Zwischengezeitengebietes definitiv unter Wasser steht, während die Zunahme der Durchflußquerschnitte sich im Prinzip über die gesamten 200 Jahre erstreckt. In der geschätzten Situation ist es jedoch wahrscheinlicher, daß ein Teil der Zunahme der Querschnitte in den ersten 100 Jahren durch Erosion realisiert wird, als Reaktion auf die Zunahme des Flutwasser-

volumens. Nach Ablauf von etwa 100 Jahren sind die Querschnitte der Haupttrinnen an die Zunahme des Flutwasservolumens angepaßt. Das Flutwasservolumen nimmt nicht mehr zu, aber die Fläche der Durchflußquerschnitte verzeichnet als Folge des Meeresspiegelanstiegs noch stets eine Zunahme. Von jenem Zeitpunkt an werden, bedingt durch die Sandzufuhr in den Rinnen und in den Zwischengezeitengebieten, Sedimente abgelagert. Es wird erwartet, daß während der angenommenen ersten 100 Jahre ein Teil des in den Rinnen erodierten Materials dem Aufbau der Zwischengezeitengebiete – besonders dem westlichen Teil – zugutekommt. Nach Abschluß des Volkerak nahm in wesentlichen Teilen der Oosterschelde der Durchfluß bei Flutstrom um 8 % zu, wodurch der Querschnitt der Haupttrinnen um ca. 6 % zunahm, während die Zwischengezeitengebiete an Höhe zunahm (lokal 0,5 bis 1 m).

Wie oben bereits erwähnt, ist die Sandzufuhr in den Becken von untergeordneter Bedeutung. Für die Oosterschelde wie für die Westerschelde kann man sagen, daß sich die Größe des Netto-Sedimenttransportes in Zukunft in bezug auf die heutige Situation nicht ändert, weil das Verhältnis zwischen der Zunahme des Flutwasservolumens und dem Durchflußquerschnitt sich über 200 Jahre im Gleichgewicht hält. Falls dann angenommen wird, daß die Oosterschelde ein Ablagerungsbecken wird, kann auf der Basis des heutigen Sedimenttransportes berechnet werden, daß die Oosterschelde in morphologischer Hinsicht in 600 Jahren wieder angepaßt sein kann. Für die Westerschelde ist es momentan auf der Basis des bestehenden Materials schwierig, eine derartige Berechnung aufzustellen. Aus diesen Gründen wird eine Anpassungsdauer der Westerschelde vorläufig mit der der Oosterschelde gleichgestellt. Ebenso wie im Wattgebiet ist auch hier nicht ganz deutlich, woher das Sediment kommen muß.

Resümierend kann festgestellt werden, daß die Oosterschelde und Westerschelde in ungefähr 600 Jahren morphologisch an einen Meeresspiegelanstieg von 5 m angepaßt sein können. Zu dieser Aussage gehört das Bild, daß lokale Zwischengezeitengebiete in den westlichen Teilen der Ästuar während der ersten 100 Jahre bestehen bleiben werden, um dann doch, mit Ausnahme einiger bestimmter Orte, für einige Jahrhunderte vom Meer bedeckt zu sein.

7. Folgen für die Umwelt

7.1 Einleitung

Für die Behandlung der globalen Umweltfolgen eines Meeresspiegelanstiegs von 5 m kann die niederländische Küste wieder in drei charakteristische Teilgebiete gegliedert werden: Die geschlossene Küste, das Delta und das Wattenmeer. Der angenommene Anstieg des Meeresniveaus hat für alle Gebiete sowohl physische als auch chemische Folgen. Diese Veränderungen, die die neuen Rahmenbedingungen für das Ökosystem bilden, sind einerseits direkt bestimmend für die biologischen Veränderungen, aber andererseits haben die biologischen Prozesse auch selbst wieder Einfluß auf erstgenannte Veränderungen (z.B. Einfluß benthischer Algenmatten auf die Festlegung von Schlick).

7.2 Folgen

In Tabelle 6 ist schematisch eine qualitative Übersicht der zu erwartenden Veränderungen gegeben; diese werden unten im Zusammenhang mit den wesentlichen biologischen Konsequenzen besprochen.

Tab. 6. Qualitative Folgen eines Meeresspiegelanstiegs von 5 m für Gebiete mit verschiedenen Landschaftstypen, für allgemeine Wasserqualität und Transportprozesse

	„Geschlossene Küste“	Wattenmeer	Deltagebiet	Flüsse
Gebiet:				
Inseln	u	--	u	u
Groden (Außendeichsland)	u	-	-	u
Zwischengezeitengebiete	0	-	-	u
Dünen	+	0	+	u
Deichoberflächen	0/+ ¹	0	++ ²	0
Sommergroden und Wehlen im Flußgebiet	u	u	u	--
Wasserqualität:				
Salzgehalt	0/+	+	+	0/+
Trübe	-	-	-	0
Temperatur	0	4	-	u
Ammonium-Verbindungen und Microverschmutzungen	abhängig von den vorgeschriebenen Emissionsanforderungen			
Transport:				
Strömung	0/+	-/+ ³	-/+ ³	0/-
Wellenenergie	0/+	0/+	0/+	0/+
¹	+ bei teilweisem Ersatz von Dünen durch Deiche			
²	++ durch Ersatz der Oosterschelde durch schwere Deiche um Schouwen-Duiveland, Nord- und Süd-Beveland und Walcheren			
³	- in heutigen Rinnen, + über heutigen Platen bzw. Nivellierung heutiger Unterschiede			
⁴	kleinere Amplitude			
u	unzutreffend			

7.2.1 Folgen für die Gebiete mit verschiedenen Landschaftstypen

In Tabelle 6 ist von einer Dezimierung der heutigen Watteninseln ausgegangen. Lediglich Teile von hohen und starken Kernen bleiben übrig. Gedacht wird hierbei an hohe Dünenpartien auf den Inseln und an den Geschiebelehmrückten von Texel. Große Teile der Inseln (Polder, Groden und niedrige Dünen) gehen sicherlich verloren. Durch diese Inselrudimente bleiben auch an der Ostseite bestimmte geschützte Plätze bestehen, wodurch das charakteristische Bild des Wattenmilieus nicht vollständig verschwindet. Sehr wahrscheinlich ist, daß sich der östliche Teil des niederländischen Wattenmeeres in ein Gebiet mit weniger Zwischenzeitengebieten entwickelt. Das westliche Wattenmeer wird mehr den Charakter von einigen heutigen dänischen Fjorden bekommen, beispielsweise des Limfjordes.

Die Groden (Außendeichsland, das nur bei extrem hohem Wasserstand überspült wird) sind durch eine reiche Vielfalt an salzliebenden höheren Pflanzen und Algen gekennzeichnet. Sie beherbergen eine artenreiche Fauna, wovon die Vögel am bedeutsamsten sind. Dieses einzigartige und relativ ungestörte, zum Meer gehörende Ökosystem geht bei einem zu erwartenden Meeresspiegelanstieg von 5 m größtenteils verloren.

Der Rückgang der Flächen von Zwischengezeitengebieten hat insbesondere ernste Folgen für viele Gruppen von Zugvögeln. Diese Vögel brüten im Sommer im Wattengebiet oder gar

im hohen Norden von Eurasien und überwintern in Mittel- und Südeuropa oder Westafrika, z.B. viele Stelzenläufer. Außer für Brutvögel ist das Wattengebiet auch für die durchziehenden Vogelarten sehr wichtig gerade in unseren Breiten, wo sie Nahrungsreserven für den zweiten Teil ihrer Flugstrecke sammeln können. Auch wird der Aufenthalt oft zum Mausern genutzt. Andere Vögel sind aufgrund ihrer Nahrung speziell abhängig von sehr seichten Stellen im Meer (z.B. Löffelreiher, Säbelschnäbler). Durch den Verlust des Wattengebietes werden die meisten dieser Vögel auch aus unseren Gebieten verschwinden. Es geht hier sicherlich um 15 bis 20 Arten.

Beim Dünengebiet der „geschlossenen Küste“ wird davon ausgegangen (Tab. 6), daß es nicht durch Deiche ersetzt wird. Durch künstliche Erhöhungen und notwendige Verbreiterungen bleibt es mehr oder weniger bestehen. Das Deichareal nimmt nach Tab. 6 zu, besonders im Deltagebiet. Für die Flußlandschaft gilt schließlich, daß die für die Niederlande kennzeichnenden Außendeichgebiete und ein Teil der biologisch reichen Kolke (soweit sie außerhalb der Deiche liegen) permanent unter Wasser geraten.

7.2.2 Folgen für die Wasserqualität

Durch die zunehmende Wassertiefe nimmt die gesamte Wassermasse entlang der Küste zu. Wenn der Abfluß der Flüsse unverändert bleibt, ist ein Anstieg des Salzgehaltes zu erwarten. Durch Veränderungen der Wasserzirkulation können jedoch örtlich Verminderungen des durchschnittlichen Salzgehaltes entstehen.

Eine Verbesserung der Sauberkeit des Wassers führt zu einem verfrühten Beginn der Frühjahrsblüte der Algen, weil dieses ein spezielles, lichtinduziertes Phänomen ist. Dies kommt in der Wachstumsperiode auch den Larven von ökonomisch wichtigen Fischarten zugute.

Durch die anfänglich auftretende Zunahme der Wassertiefe wird in den Ästuaren die Amplitude der Temperaturunterschiede geringer. Hierdurch wird die relativ schnelle Aufwärmung des Ästuarwassers im Vorfrühling ausbleiben. Das hat Wachstumsverzögerungen der sich in den Ästuaren entwickelnden Larven von (kaltblütigen) marinen Organismen zur Folge.

7.2.3 Auswirkungen von physischen Veränderungen

In der Zone der „geschlossenen Küste“ werden sich durch eine mögliche Veränderung der Gezeitenamplitude die Strömungsgeschwindigkeiten verändern können. Veränderungen bei Bodenströmungen können bis zu Veränderungen in der Ausbreitung von Organismen führen, die bei ihrer Wanderung von Wasserströmungen abhängig sind.

Es bestehen verschiedene Arten von Organismen nebeneinander, weil einige Arten in den Prielen, andere auf den Platen ihre Nahrung suchen (z.B. Scharbe und Scholle). Im neuen System können beide Arten gegeneinander konkurrieren, weil die unterschiedlichen Lebensräume angesichts der zunehmenden Überflutung kleiner werden.

Die Wellentätigkeit wird durch eine Verminderung der Energiedissipation am Boden größer, vor allem auf den früheren Platen. Dies führt zu verstärktem Wellenangriff. Einige Ökosysteme sind überaus empfindlich gegen eine zu hohe Wellenenergie, z.B. Seegrass.

8. Lösungen

Bei den im folgenden zu präsentierenden, möglichen Maßnahmen in Form von wasserbautechnischen Konstruktionen muß der Aspekt der Flexibilität im Vordergrund stehen. Es werden hier für die Teilgebiete die wahrscheinlichsten wasserbautechnischen Möglichkeiten genannt, um die Auswirkungen wie Küstenrückgang und Verlust an Zwischengezeitengebieten soweit wie möglich zu begrenzen und gegebenenfalls zu kompensieren. Es wird unterschieden zwischen den Möglichkeiten, ein Teilgebiet insgesamt oder teilweise vor dem Meeresspiegelanstieg und den daran gekoppelten Auswirkungen abzuschließen (also „offen“ und „geschlossen“).

8.1 Offene Varianten

8.1.1 Wattenmeer

Bei einem offenen Wattenmeer kommt man zu folgenden Maßnahmen:

- Erhöhung der Seedeiche Groningen, Friesland, Abschlußdeich, Kop van Noord-Holland und entsprechende Anpassung auf den Inseln;
- Förderung natürlicher Sedimentation mittels Faschinenlahnungen, künstlich aufgeschütteter Sanddämme usw.
- Wenn diese natürliche Sedimentation bei den Entwicklungen, die die Gleichgewichtsprofile erfordern, zurückbleibt, kann zu künstlicher Sandzufuhr übergegangen werden, um besonders mit dem hereinkommenden Flutstrom die Materialzufuhr zu vergrößern. Für eine bestmögliche Erhaltung der Gradienten in dem Biotop ist erwünscht, daß nicht allein grobes Material, sondern auch feiner Sand und Schlick zugeführt werden.
- Für die Erhaltung der Dünenketten (und eventuell der Platen) auf den Inseln muß grober Sand ergänzt werden (auf dem Vorstrand und insofern auch auf den Platen und Dünen).

8.1.2 Geschlossene Küste

Für die Erhaltung der Küstenlage kommen folgende Maßnahmen in Betracht:

- *Ergänzen*: Auf Vorstrand, Strand und – soweit notwendig gegen Überschwemmung – auf den Dünen, wird eine große Menge Sand aufgeschüttet oder aufgespült. Im Zusammenhang mit ökologischen Aspekten kann es notwendig sein, daß an bestimmten Teilen der Küste spezifisch kalkarmer oder kalkhaltiger Sand aufgebracht wird.
- *Hängender Strand*: Durch den Bau eines Steindamms auf dem Vorstrand parallel zur Küste kann ein sogenannter hängender Strand geschaffen werden. Durch Aufspülungen braucht dann nur der Teil zwischen der Dünenreihe und dem Steindamm ergänzt zu werden. Der Vorteil besteht darin, daß nicht der gesamte Fuß des neuen Gleichgewichtsprofils aufgefüllt werden muß;
- *Tombolos*: Mit Hilfe unterbrochener Dammschüttungen in einigem Abstand parallel von der Küste oder durch künstliche Inseln, in Kombination mit einer Sandauffüllung zwischen diesen und der alten Küstenlinie, können sogenannte Tombolos angelegt werden. Es kann so ein wattähnliches Milieu geschaffen werden;
- *Deiche*: Schließlich besteht die Möglichkeit, anstelle der heutigen Küstenlinie oder in einigem Abstand davon eine herkömmliche Deichkonstruktion anzulegen. Natürlich ist dies, was Flexibilität und Handhabung betrifft, die schlechteste Lösung.

8.1.3 Deltagebiet

Im Deltagebiet sind für die einzelnen Sub-Systeme folgende Aspekte zu beachten:

- Oosterschelde:
- Anpassen des Sturmflutsperrwerks und Erhöhung der Seedeiche sind notwendig;
- Maßnahmen zur Förderung der natürlichen Sedimentation sind zu treffen. Angesichts der relativ geringen Sedimentzufuhr werden diese Maßnahmen weniger effektiv sein als im Wattenmeer.

- Künstliche Sandzufuhr zur Beschleunigung der Sedimentation wird hier nur zum Teil möglich sein angesichts der Entfernung, die zwischen den Ergänzungs- und den Sandgewinnungsgebieten überbrückt werden muß.

- Zugunsten der Erhaltung der Gradienten in dem Biotop wäre eine Differenzierung des aufgespülten Materials wünschenswert.

- Um die genannten Prozesse besser steuern zu können und um damit restlichen Teilen eine größere Chance auf Lebensfähigkeit zu geben, kann es sich unter Umständen als notwendig erweisen, daß eine Aufteilung vorgenommen werden muß.

- Westerschelde:

- Hierfür gilt in groben Zügen dasselbe wie für die Oosterschelde. Der hinzukommende Faktor ist hier die Schifffahrt, die durch die Zunahme der Wassertiefe keine Probleme haben wird und deshalb keine ergänzenden Maßnahmen erfordert.

- Grevelingen/Haringvliet:

- Abgesehen von den hier vorhandenen Sperrwerken müssen die Schleusen angepaßt werden.

- Europoort:

- Bei einem „offenen“ Europoort wird die gesamte Hafeninfrastuktur an den neuen Wasserstand angepaßt werden müssen. Angesichts des Zeitraums, der hiermit in Relation der zur Abschreibung geleisteten Investitionen verbunden ist, wird erwartet, daß dies allmählich und ohne allzuviel Kapitalverlust passieren kann. Ein hinzukommendes Problem ist, daß der erhöhte Wasserstand nicht allein bis zum Europoort begrenzt bleibt, sondern sich landeinwärts erstrecken wird (siehe Kapitel 3). Über Deicherhöhungen und wasserbautechnischen Konstruktionen wird dies kompensiert werden müssen.

- Die Zugänglichkeit von Europoort wird mit dem Anstieg des Meeresspiegels zunehmen. Hierfür sind keine ergänzenden Maßnahmen notwendig.

8.2 Geschlossene Varianten

8.2.1 Wattenmeer

Im Fall eines völlig abgeschlossenen Wattenmeeres mittels eines Ringdeichs wird die Gesamtheit der heutigen Naturwerte verschwinden. Abhängig von der Wahl süß oder salzig kann im letzten Fall an eine Veränderung zum salzigen Milieu hin gedacht werden, wie es z. Zt. in Grevelingen angetroffen wird. Ein Vorteil dieser unflexiblen Lösung besteht darin, daß technisch gesehen die Zielsetzung „Sicherheit“ schnell erreicht werden kann.

8.2.2 Geschlossene Küste

Hierfür wird auf Lösungen verwiesen, die bereits bei den offenen Varianten zur Sprache gekommen sind.

8.2.3 Deltagebiet

- Oosterschelde:
- Bei einer geschlossenen Oosterschelde wird im günstigsten Fall mit dem nötigen Eingreifen ein Milieutyp wie der von Grevelingen geschaffen werden können.
- Eine Deicherhöhung über die gesamte Becken-Trasse ist nicht nötig.
- Westerschelde:
- Für die Erhaltung der Schifffahrt werden eine oder mehrere Schleusen notwendig sein.
- Für den Oberwasserabfluß der Schelde muß ein dafür geeignetes Auslaßbauwerk, das dem maximalen Abfluß angepaßt ist, errichtet werden (Stauraumkapazität begrenzt).
- Deicherhöhung entlang des Beckens ist nicht notwendig.
- Europoort:
- In groben Zügen gilt hier dasselbe, was schon bei der Westerschelde angemerkt ist. Das Auslaßbauwerk für den Oberwasserabfluß des Rheins kann hier in Zusammenhang mit begrenzt zur Verfügung stehender Stauraumkapazität zu Problemen Veranlassung geben.